

Перетворення фізичних величин

Означення

Фізична величина m , що характеризує об'єкт вимірювань (температура , тиск тощо), називається **вимірюваною величиною**.

Сукупність операцій спрямованих на встановлення чисельного значення фізичної величини – **процес вимірювання** .

Якщо при вимірюванні використовуються електронні засоби обробки сигналу , необхідно спочатку перетворити вимірюваний параметр в еквівалентну електричну величину.

Отримана електрична величина повинна містити всю інформацію про вимірюваний параметр.

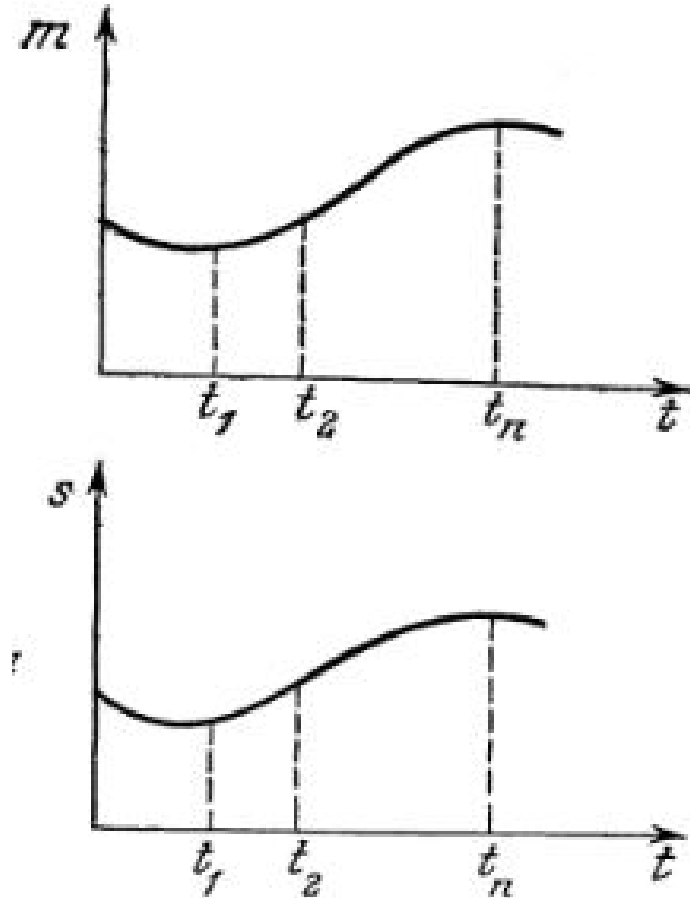
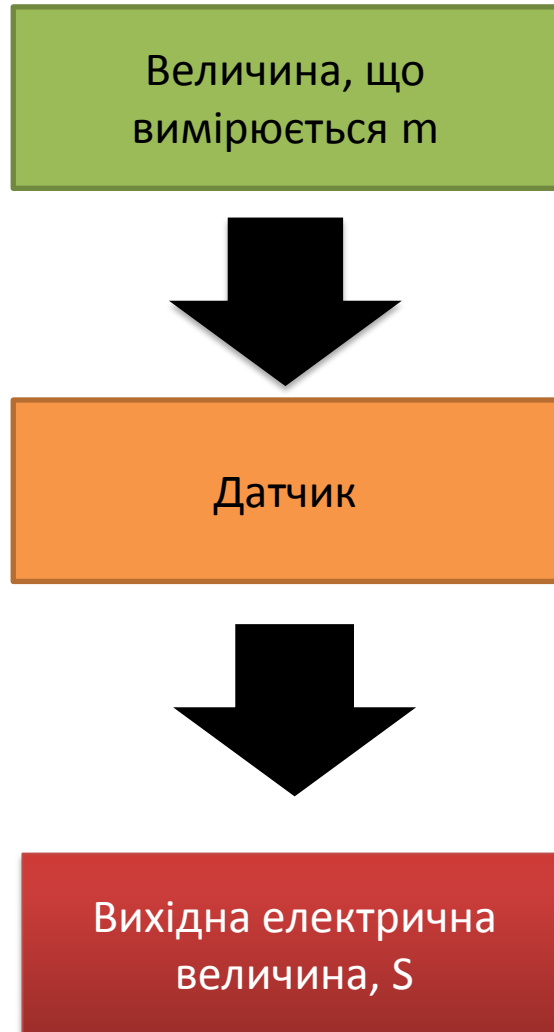
Датчик - це пристрій, який під дією впливу фізичної вимірюваної величини , видає еквівалентний сигнал , зазвичай електричної природи (заряд,струм , напруга або імпеданс), що є функцією величини, що вимірюється :

$$S=f(m)$$

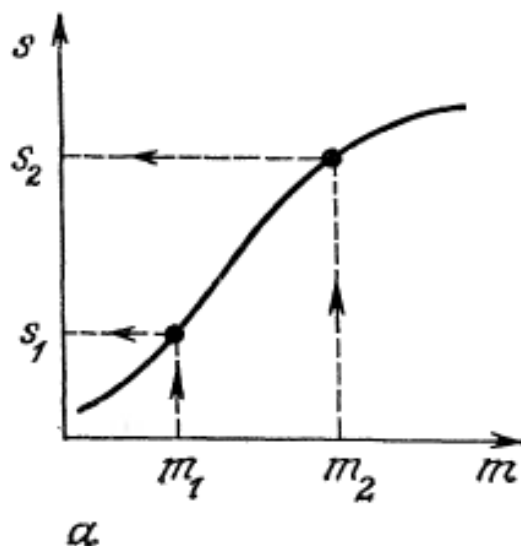
m - вхідна величина

S - вихідна величина

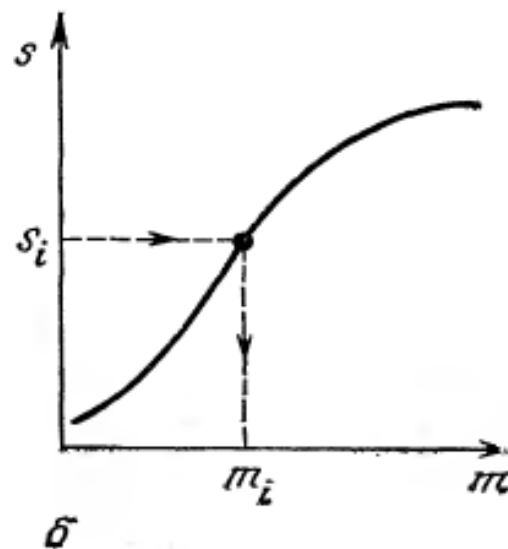
Вимірювання величин



Градуювальна характеристика датчика



Отримання градувальної кривої по відомим значенням величини m



Використання градувальної кривої для визначення величин m

$\Delta s = S \Delta m$, S – чутливість сенсора. Сенсор намагаються спроектувати так, щоб залежність була лінійна !

Типи датчиків

Активні

Генератор видає
струм, напругу,
заряд

Перетворення
фізичної величини,
що вимірюється в
електричну
величину

Пасивні

Вихідний опір,
ємність,
індуктивність

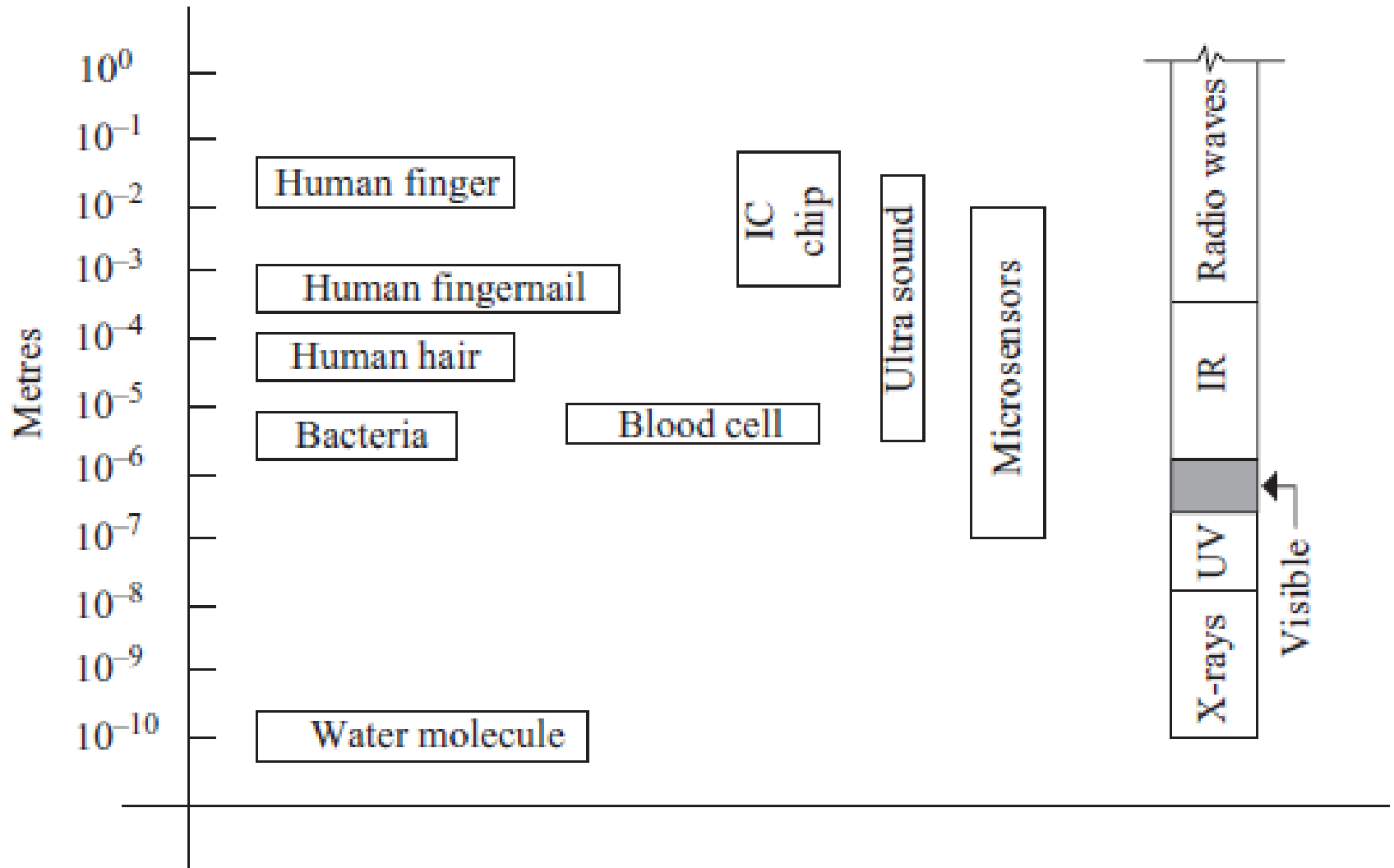
Excitation	Operating physical variables
Acoustic	Amplitude, phase Spectrum Wave speed
Chemical	Components (concentration, states, etc.)
Biological	Biomass (concentration, states, etc.)
Electrical	Charge, current Potential, potential difference Electric field (amplitude, phase, polarization, spectrum) Conductivity, permittivity
Magnetic	Magnetic field (amplitude, phase, polarization, spectrum) Magnetic flow, permeability
Optic	Wave: amplitude, phase, polarization, spectrum Speed, wave length
Thermal	Temperature, thermal flow Specific heat Thermal conductivity
Mechanical	Position (linear, angular) Speed, acceleration Force, pressure Constraints, density mass Time Flow speed Form, hardness, orientation Viscosity
Radiation	Nature or type Energy Intensity

Quantity being Measured	Input Device (Sensor)	Output Device (Actuator)
Light Level	Light Dependant Resistor (LDR) Photodiode Photo-transistor Solar Cell	Lights & Lamps LED's & Displays Fibre Optics
Temperature	Thermocouple Thermistor Thermostat Resistive temperature detectors (RTD)	Heater Fan
Force/Pressure	Strain Gauge Pressure Switch Load Cells	Lifts & Jacks Electromagnet Vibration
Position	Potentiometer Encoders Reflective/Slotted Opto-switch LVDT	Motor Solenoid Panel Meters
Speed	Tacho-generator Reflective/Slotted Opto-coupler Doppler Effect Sensors	AC and DC Motors Stepper Motor Brake
Sound	Carbon Microphone Piezo-electric Crystal	Bell Buzzer Loudspeaker

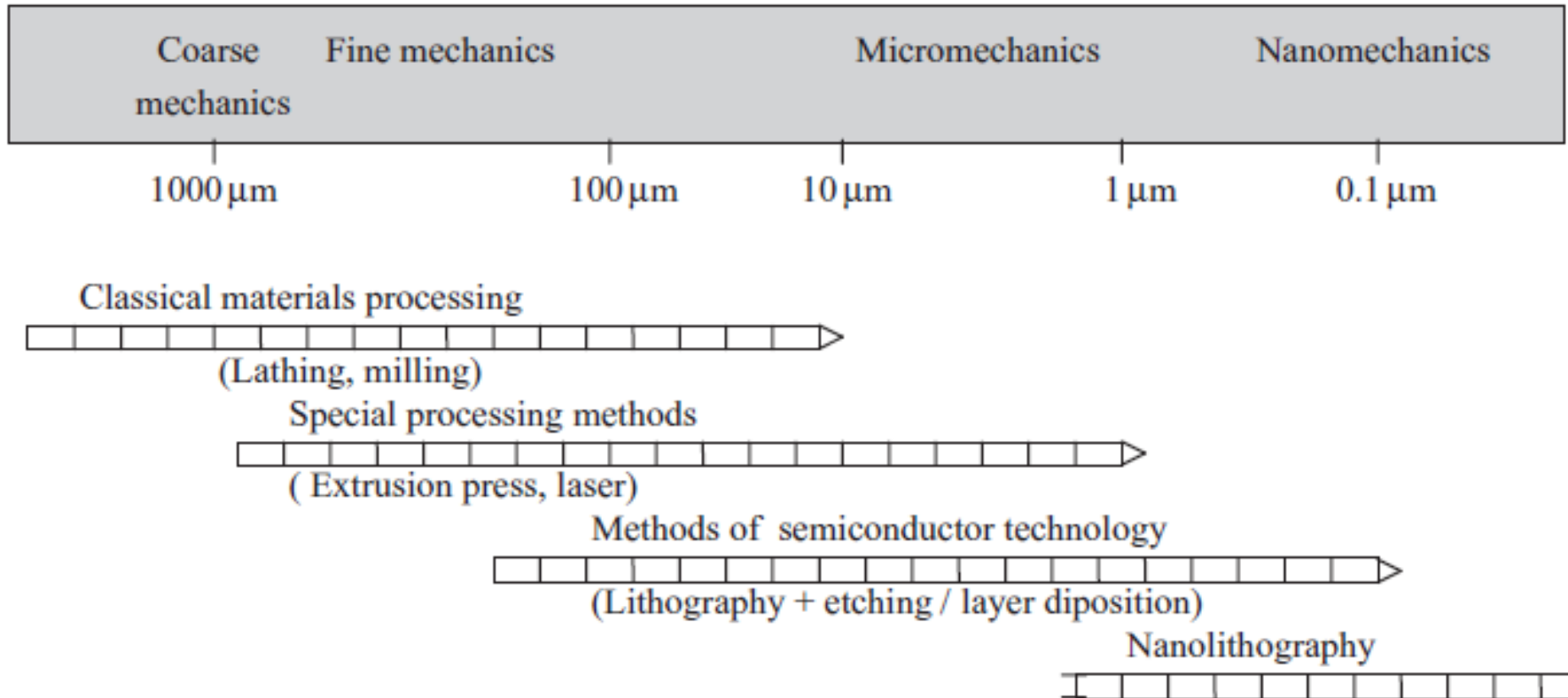
Фізичні ефекти в основі сенсорів

Physical dimension	Effect	Application
Radiation	Photoresistive	Photoresistor
	Photointerface	Photodiode, phototransistor
	Ionisation	Nuclear radiation sensor
	Photocapacitive	Photocapacitance
Mechanical	Piezoresistive, piezojunction and piezotunnel	Piezoresistive power and pressure sensors, piezoelectric diode and transistor
Thermal	Thermal resistance	Resistance temperature sensors
	Thermojunction	Temperature sensors (diode, transistor)
	Thermoelectric	Thermopile
	Pyroelectric	Pyroelectric sensor
Magnetic signals	Magnetoresistive	Magnetoresistive sensors
	Hall	Hall generator
	Magnetic interface	Magnetic diode and transistor
Chemical signals	Charge sensitive field	ISFET

Порівняльні розміри сенсорів




Мікромеханіка



Типи сенсорів

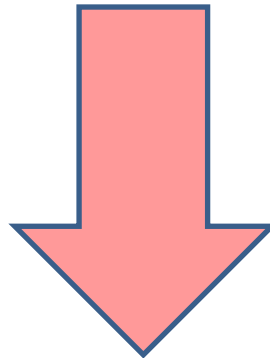
Фізичні сенсори



Дистанція
Маса
Тиск
Температура
...

Хімічні сенсори

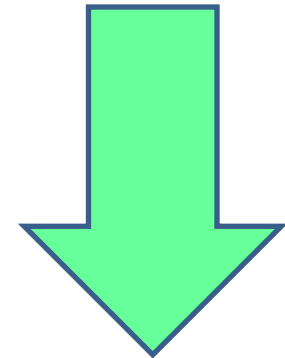
Хімічний чи
фізичний відгук



Присутність
і
концентрація
хімічних речовин

Біосенсори

Біологічний
чутливий
елемент



Присутність
і
концентрація
хімічних речовин

Елементи хімічного сенсора



Characteristics	Definitions
Zero offset	Zero offset is true relation of the zero output variable with the value of the measurand.
Drift	Temporal variations in system characteristics.
Dynamic	Admissible intervals of variation for input variables (in decibels).
Hysteresis	Maximum difference in output values, when the input variable is reached from minimum, then maximum admissible in algebraic value.
Linearity	Degree of concordance between the static state diagram and a straight line used as reference. (A straight line of the fewest squares calculated on calibration points, the line joining the farthest points throughout the measurement.)
Relaxation	Time lag between the cause and effect of a physical phenomenon, given in the form of a time constant.
Repeatability	Margin of fluctuation in output variable when the same input variable is applied several times under the same conditions.
Resolution	Smallest increase in the input variable leading to a change in the output variable.
Sensitivity	Ratio of change in output variables to the corresponding change in input variables.
Threshold	Threshold resolution is the smallest change of the input variable relative to zero value.
Response time	For a measurable excitation, this is the time required for an immediate value and a final value to be lower than a specified value (1%, for example).

Параметри хімічних сенсорів

Чутливість (*Sensitivity*)

Мінімальна межа детектування (*Detection limit*)

Динамічний діапазон вимірювання (*Dynamic range*:)

Селективність (*Selectivity*:)

Лінійність (*Linearity*:)

Роздільна здатність (*Resolution*:)

Час відповіді сенсора (*Response time*)

Гістерезис (*Hysteresis*)

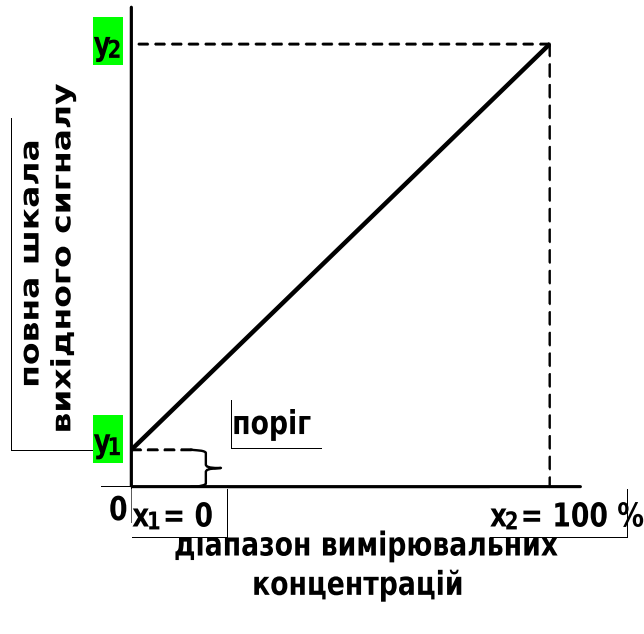
Повторюванність

Стабільність (*Stability*)

Час життя (*Life cycle*)

Крос-чутливість

Залежність сигналу лінійного сенсора від вологості



Динамічний діапазон вимірюваних концентрацій

повна шкала вихідного сигналу

формат вихідного сигналу- аналоговий або цифровий

Чутливість сенсора визначається як відношення зміни вихідного сигналу до відповідної зміни вимірюваної концентрації

У випадку лінійного відгуку сенсора, тобто коли його чутливість стала для всього діапазону вимірюваних концентрацій

Мінімальна межа детектування – мінімальна концентрація аналіту, що може бути детектована впри даних умовах

Динамічний діапазон вимірювання – діапазон концентрацій між мінімальною межею детектування і максимальною концентрацією.

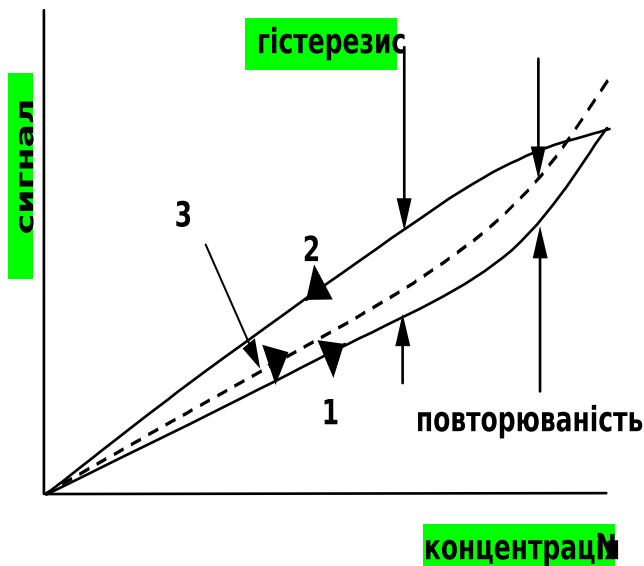
Селективність – визначає, чи сенсор реагує на групу аналітів чи на окремий аналіт. Для кількісної характеристики використовують коефіцієнт селективності.

Властивість сенсора визначати і вимірювати тільки одну хімічну компоненту за присутності інших у суміші газів чи розчинах. У загальному випадку хімічні сенсори характеризуються невисокою селективністю, тобто вони є скоріше неселективні ніж селективні, і одночасно реагують на присутність кількох газів. Тому хімічні сполуки розпізнають при спеціальній обробці сигналу від матриці сенсорів, використовуючи *алгоритм (методику) розпізнавання образів*

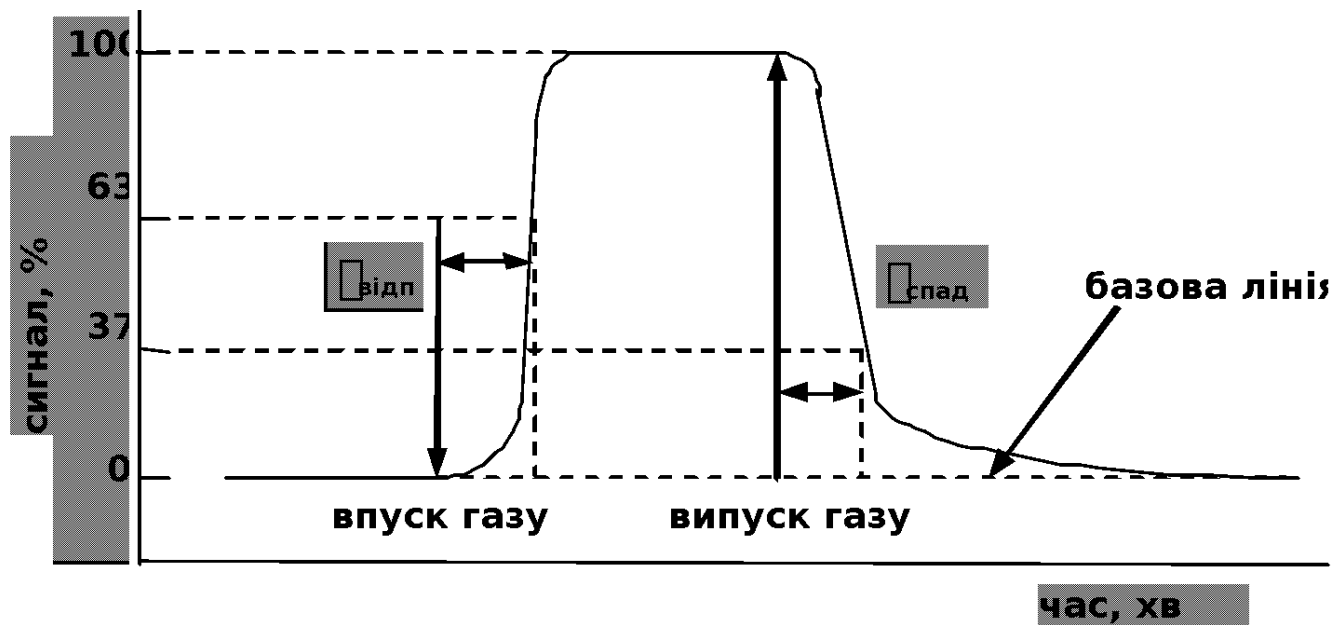
Лінійність – це відхилення від прямої лінії градувальної характеристики даного сенсора, яке вимірюється у відсотках.

Гістерезис характеристики – це максимальна різниця вихідного сигналу в будь-якій точці, яка визначається при двох послідовних вимірюваннях, коли концентрація газів зростає та падає. Гістерезис визначають у відсотках до повної шкали вихідного сигналу.

$$\Delta y(x_i) / (y_1 - y_2)$$



до пояснення ефектів
гістерезису та повторюваності:
1 – перше вимірювання, коли N
зростає,
2 – друге вимірювання, коли N
зменшується,
3 – n -циклів вимірювання, коли
 N зростає



Типова зміна сигналу сенсора при впуску та випуску газу

Час відповіді сенсора – це час, за який вихідний сигнал сенсора досягає 63 (90)% від максимальної величини при зміні концентрації (парціального тиску) вимірюваного газу від нуля до даної концентрації (парціального тиску).

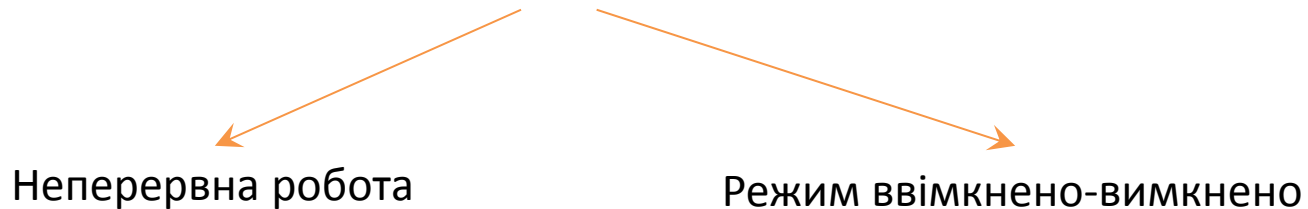
Час відновлення – це час, за який вихідний сигнал падає до 37 % (в e разів), чи до 10 % від максимального при зміні концентрації (парціального тиску) вимірюваного газу до нуля.

Повторюваність – це властивість сенсора показувати однакові вихідні характеристики в послідовності циклів вимірювання й визначається максимальною різницею між вихідними сигналами для різних циклів вимірювання. Так само як і гістерезис, визначається у відсотках щодо повної шкали вихідного сигналу .

Крос-чутливість (у відносних відсотках)- чутливість до певного газу при наявності іншого газу.

Стабільність – властивість сенсора підтримувати свої характеристики певний період часу. Як показник використовують дрейф вихідного значення при нульовій вхідній концентрації.

Час життя – час протягом якого сенсор може функціонувати. Розрізняють максимальний час збереження (*shelf time*) і максимальний час роботи (*operating life*)



Шуми

Зовнішні умови його роботи:

температура

вологість

атмосферний тиск

наявність в атмосфері інших газів

електромагнітні поля

удари

вібрація

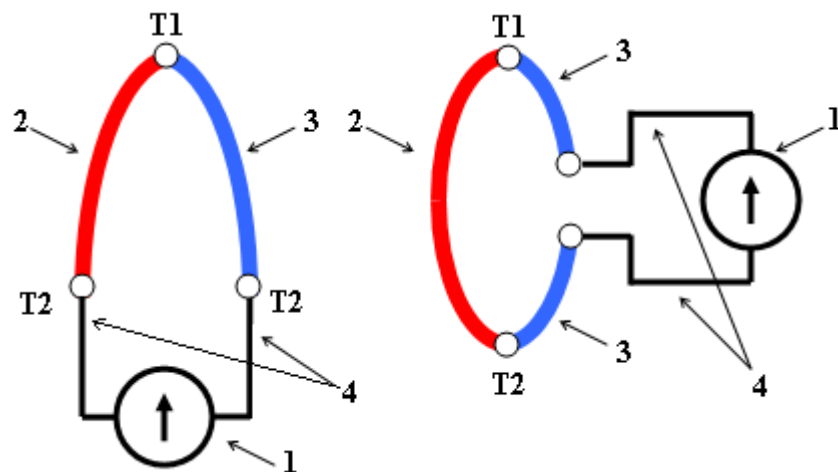
Ціна

Датчики. Термоелектричний ефект

Термопара

Два провідники з різних металів М1 і М2 при різних температурах -> термоЕРС (ефект Зеебека) ~ різниці температур

Метал №1	Метал №2	Діапазон температур, К
Золото леговане залізом	Мідь або хромель	4—270
Мідь	Констант	0—800
Хромель	Копель	220-900
Хромель	Алюмель	220—1400



Один з контактів часто термостатується
Наприклад при 273 К

Способи виміру Т

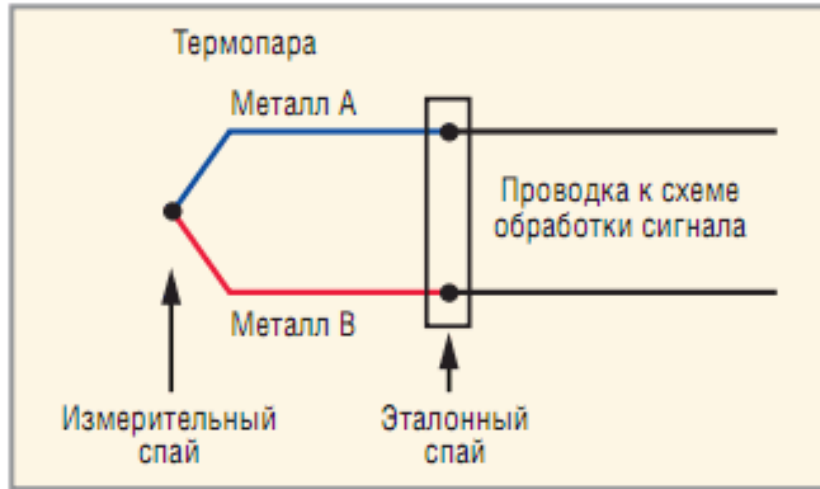


Рис. 1. Термопара

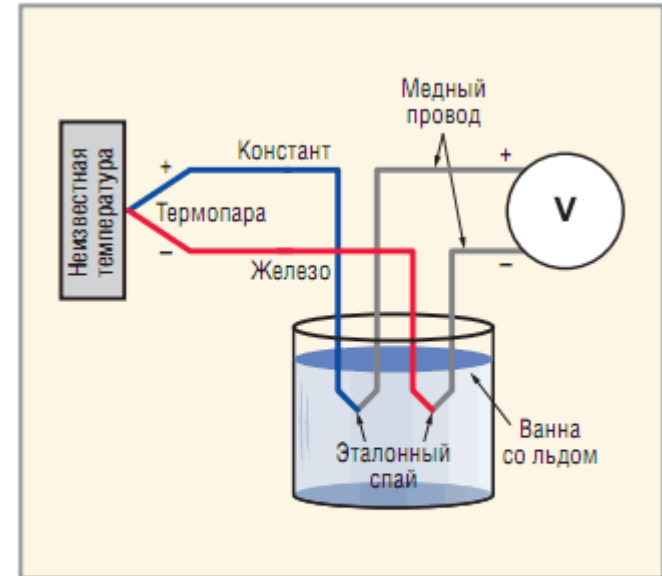


Рис. 2. Первичная цепь железно-константановой термопары

Застосовують технологія яка називається компенсація етатонного спаю – вимірюють температуру цього спаю іншим температурний датчиком – термістором, діодом, резистивним датчиком температури і потім вносять поправку

Thermocouple Sensor Colour Codes

Extension and Compensating Leads

Code Type	Conductors (+/-)	Sensitivity	British BS 1843:1952
E	Nickel Chromium / Constantan	-200 to 900 ⁰ C	
J	Iron / Constantan	0 to 750 ⁰ C	
K	Nickel Chromium / Nickel Aluminium	-200 to 1250 ⁰ C	
N	Nicrosil / Nisil	0 to 1250 ⁰ C	
T	Copper / Constantan	-200 to 350 ⁰ C	
U	Copper / Copper Nickel Compensating for "S" and "R"	0 to 1450 ⁰ C	

Тип термопары	Коефіцієнт термоЕРС мкВ/°С
E	61
J	52
K	41
N	27
R	9
S	6
T	41

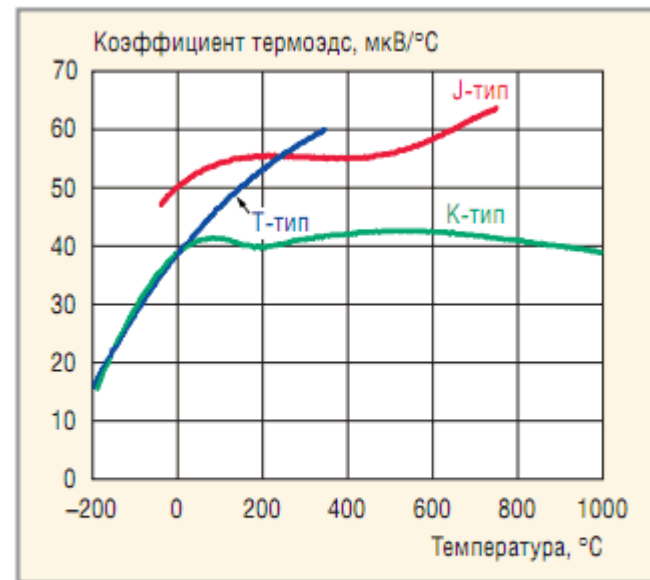
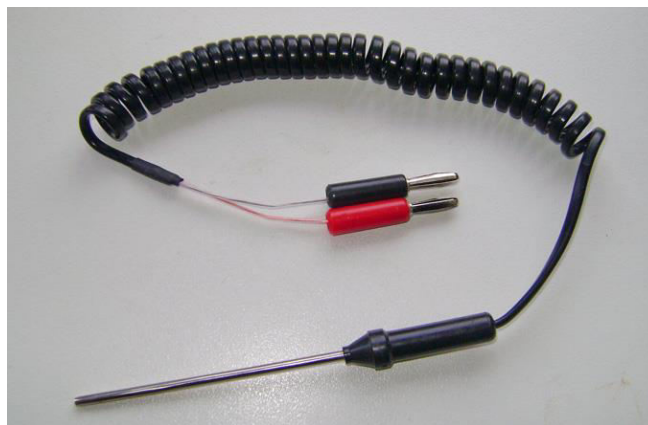
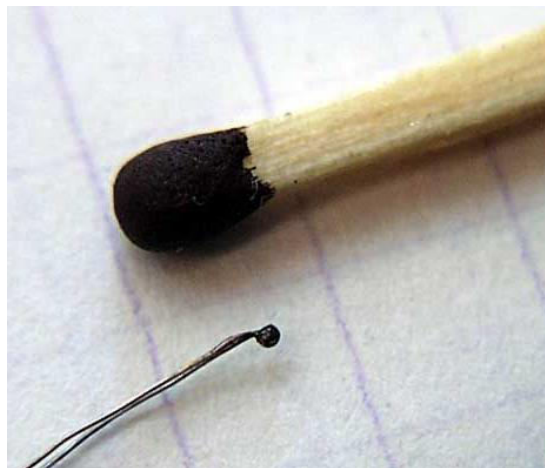


Рис.3. Изменение чувствительности термопары с температурой



Переваги

Температурний діапазон: -200 до +2500 С.

Надійність: несприйнятливості до ударів і вібрацій

Швидкий відгук: Невеликий розмір і низька теплоємність -> швидкодія (декілька сотень мілісекунд)

Відсутній саморозігрів так як відсутнє живлення.

Недоліки

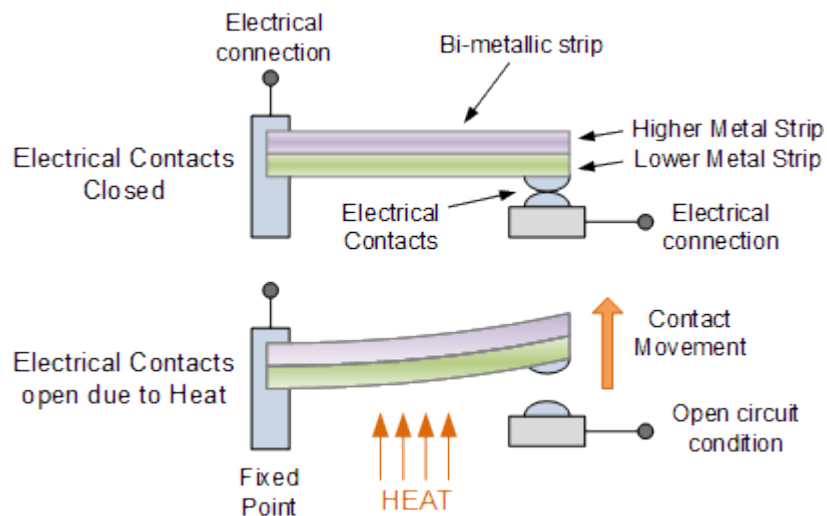
Складна обробка сигналу

Точність 1...2 С

Корозія

Піддаються впливу шумів

Бі-металічний термостат

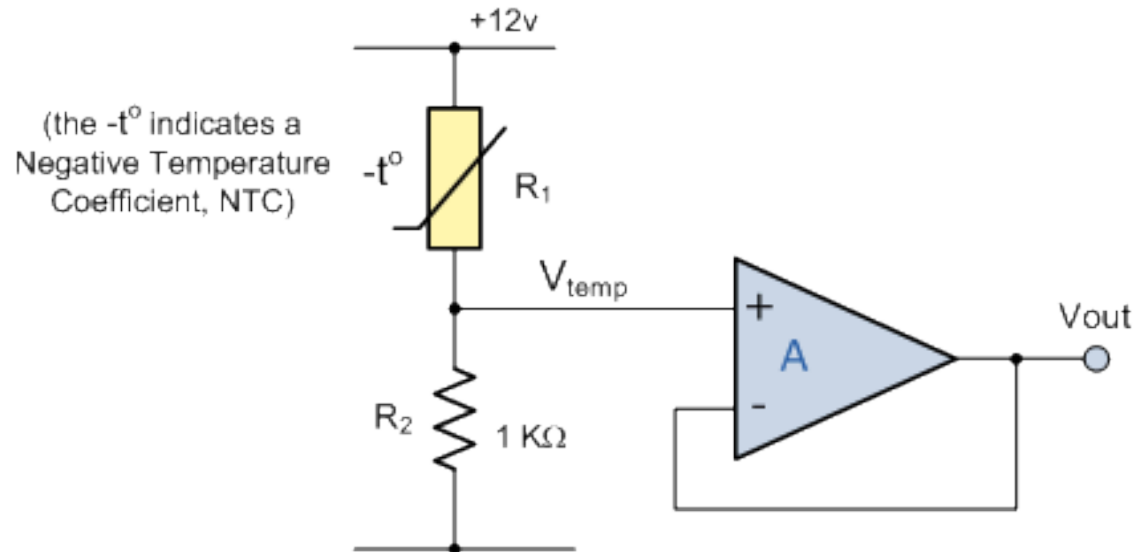


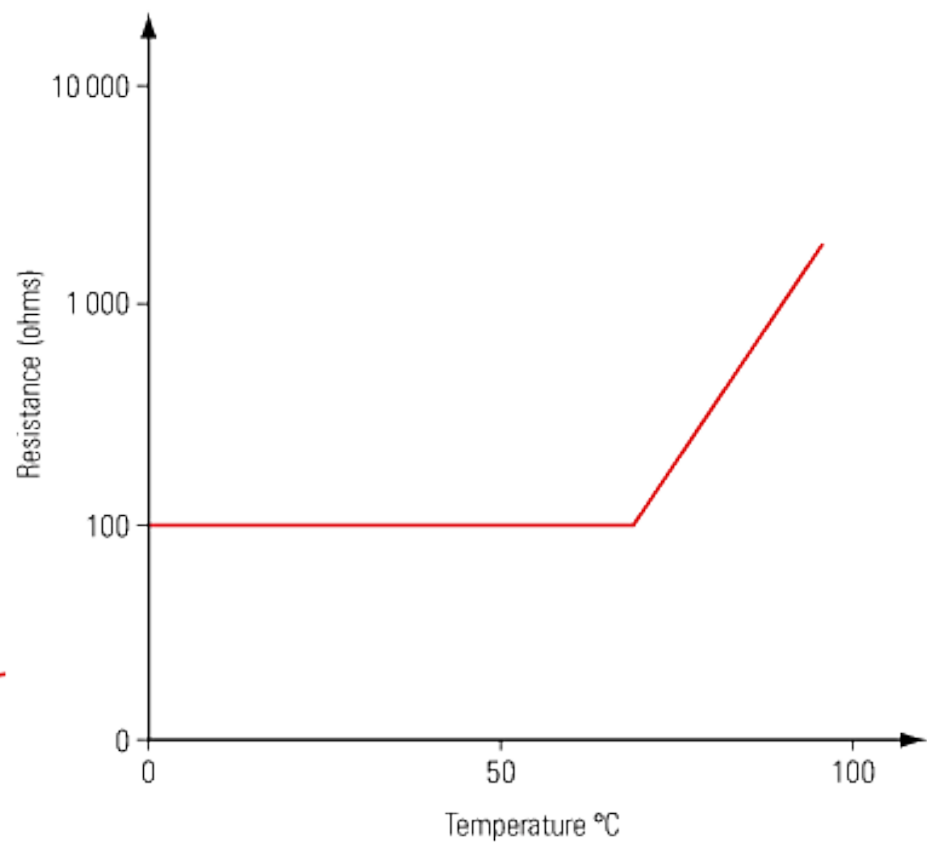
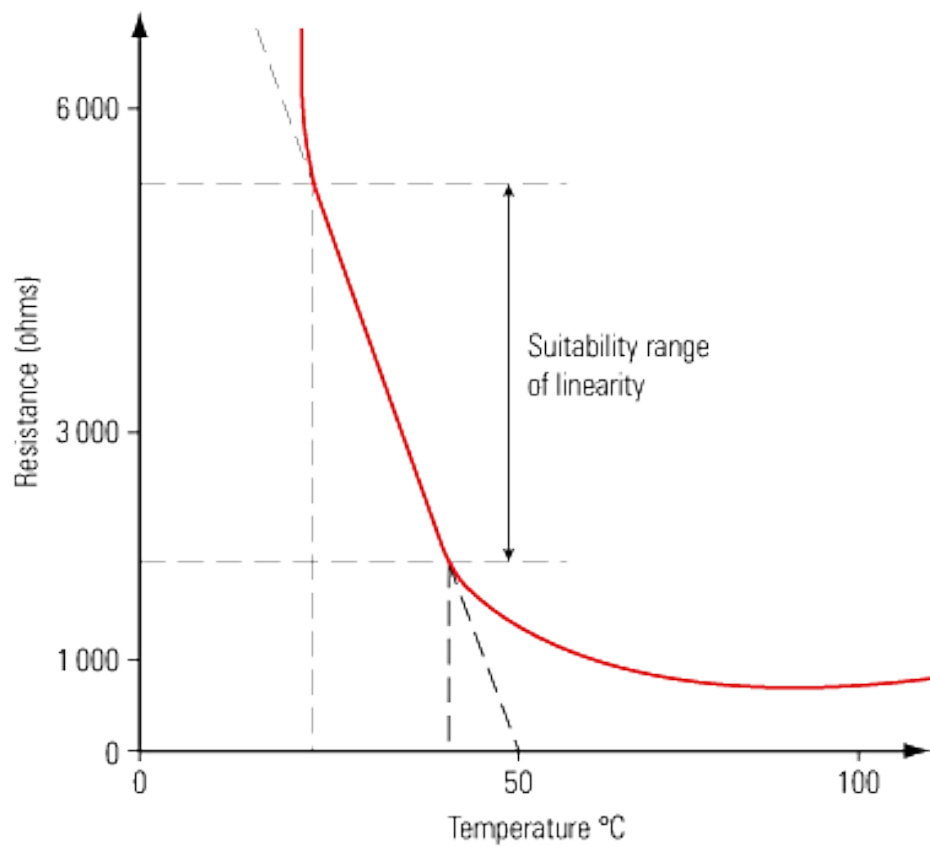
Термістор

THERM-ally sensitive res-**ISTOR**



Напівпровідниковий
матеріал





Датчики. Піроелектричний ефект

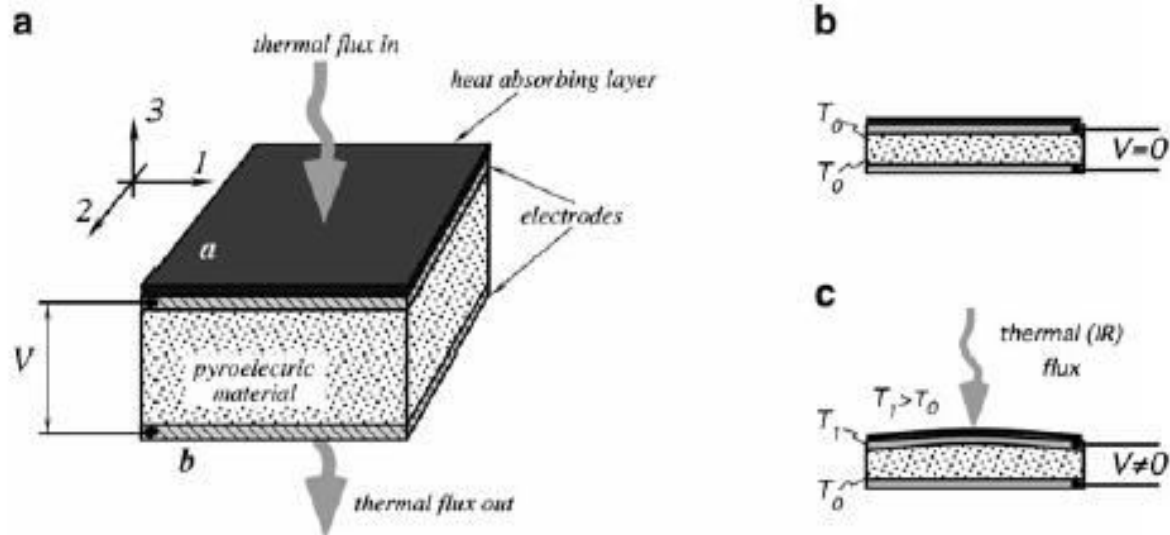
Піроелектрик — речовина, в якій існує спонтанний електричний дипольний момент.

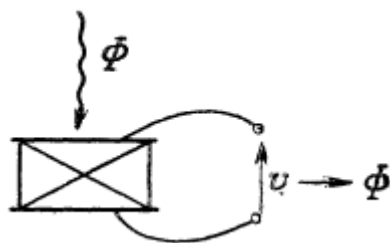
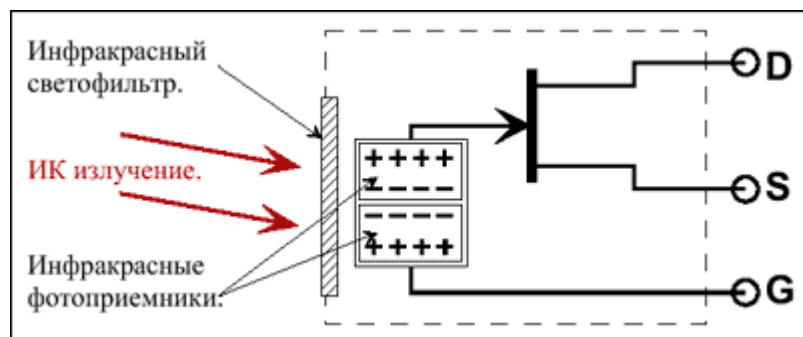
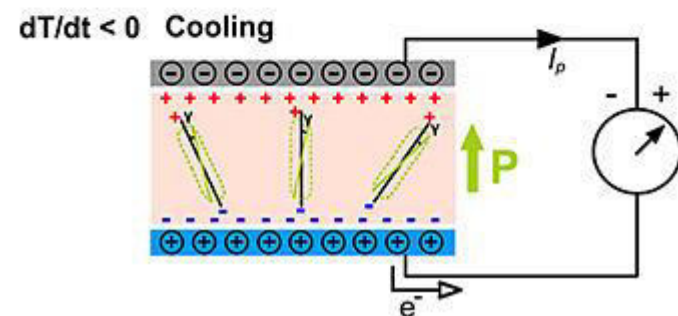
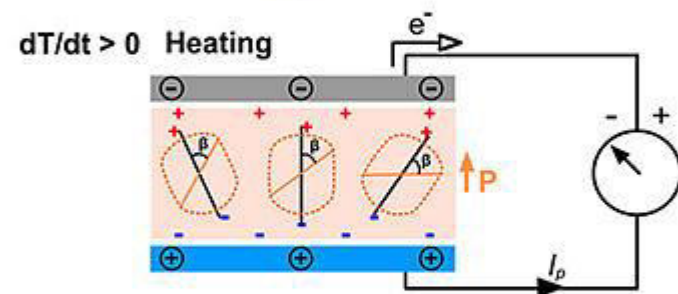
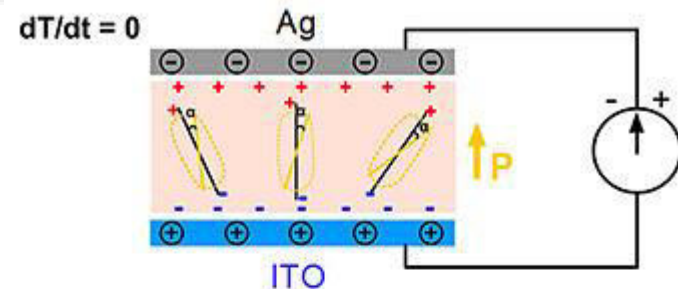
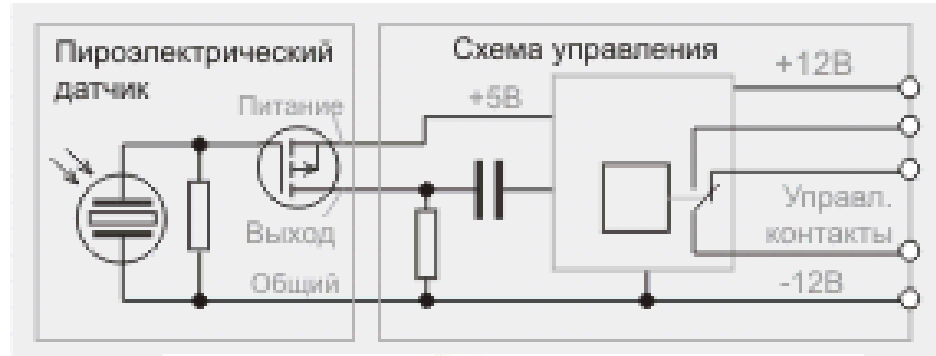
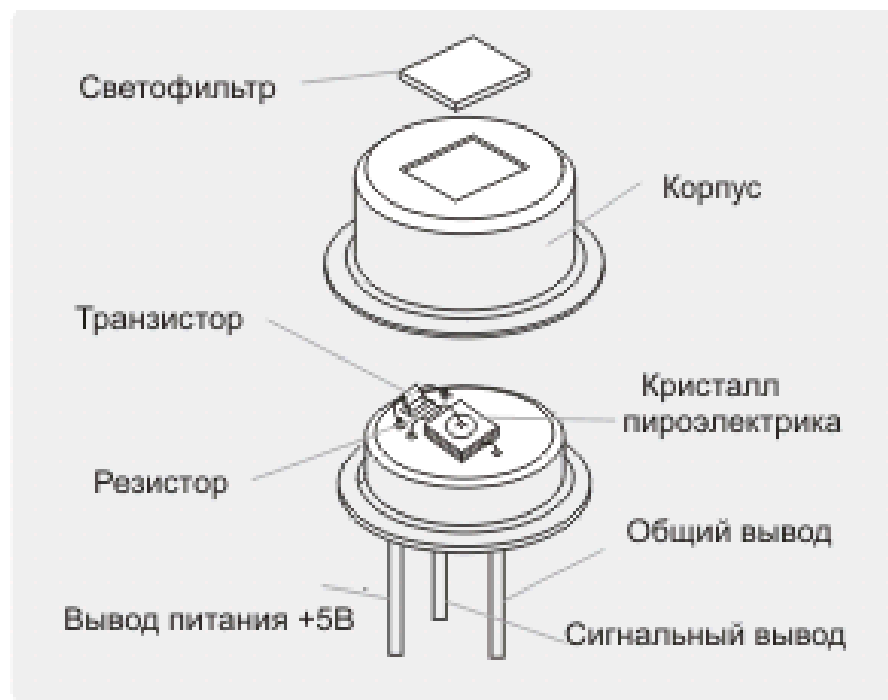
Це спонтанно поляризовані п'єзоелектрики, ступінь поляризації яких залежить від температури.

На протилежних кінцях виникають при нагріві заряди протилежного знаку.

Величина заряду \sim пропорційна поляризації \sim температурі

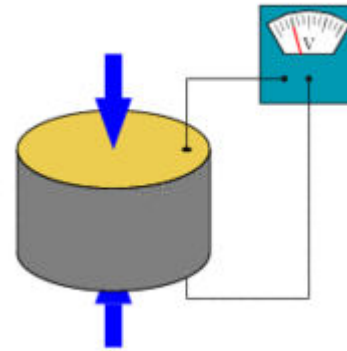
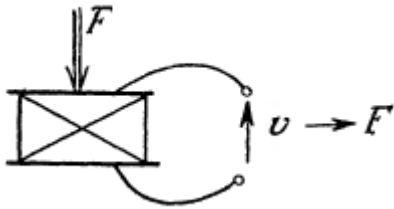
Матеріали: вермікуліт, нефелін, канкриніт, піротин та ін. мінерали.



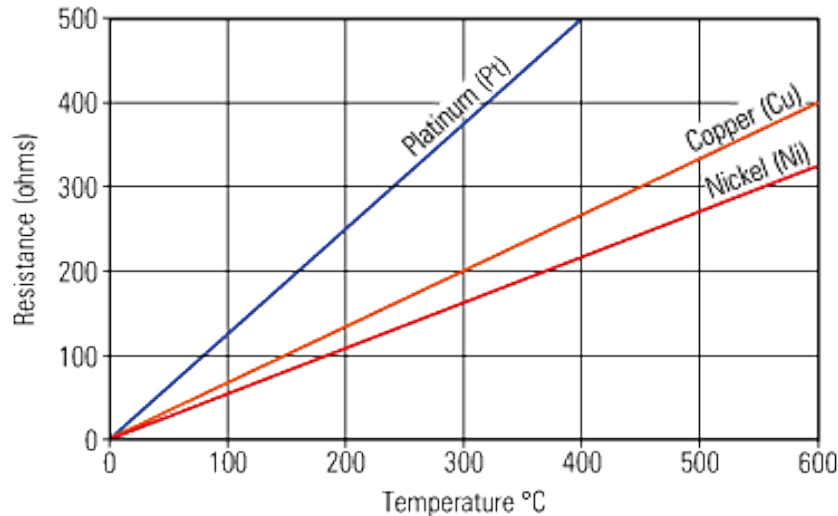


Датчики. П'єзоелектричний ефект

П'єзоелектрики - це речовини що змінюють свої розміри при подачі до них електричного поля, і навпаки при стисненні яких на певних точках їхніх поверхонь виникає електричне поле

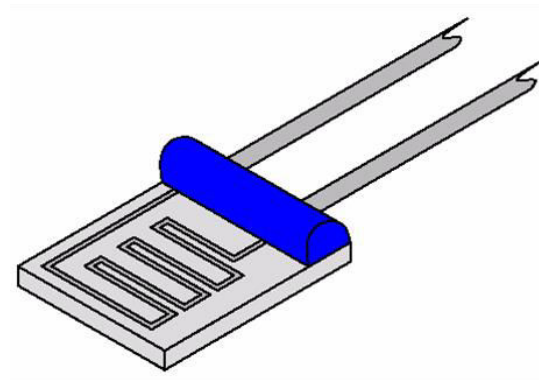
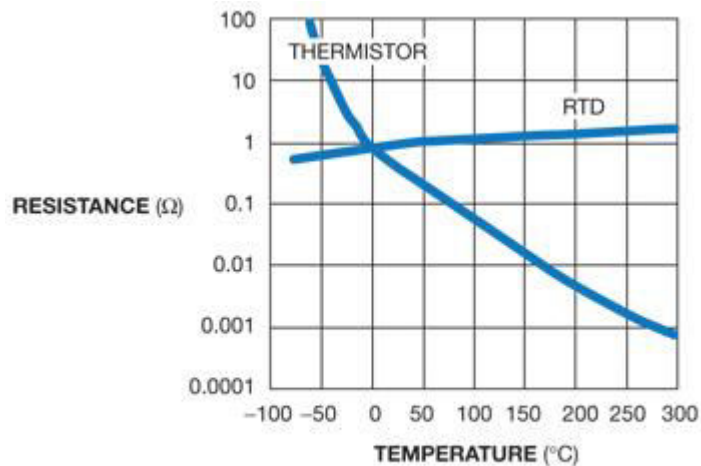


Resistive Temperature Detectors (RTD)

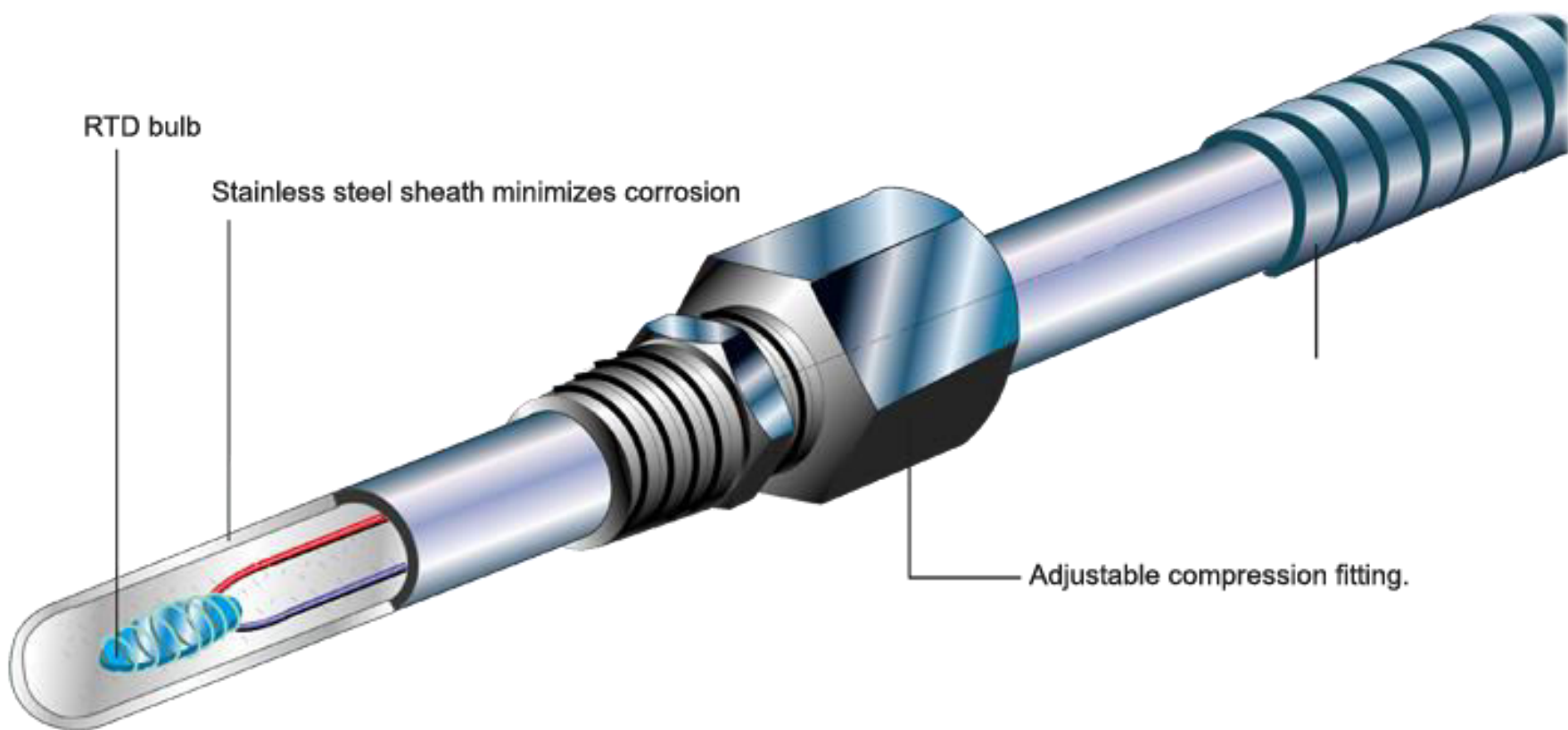


$$R=f(T)$$

- хімічна інертність
- близька до лінійної залежності опору від температури
- достатньо великий температурний коефіцієнт опору,
- стабільність

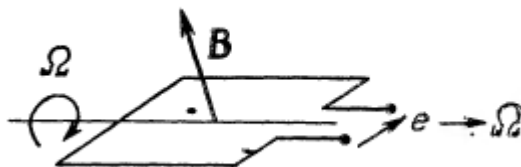


The RTD element's resistance is much lower than that of an NTC thermistor element.



RTD (Resistance Temperature Detector)

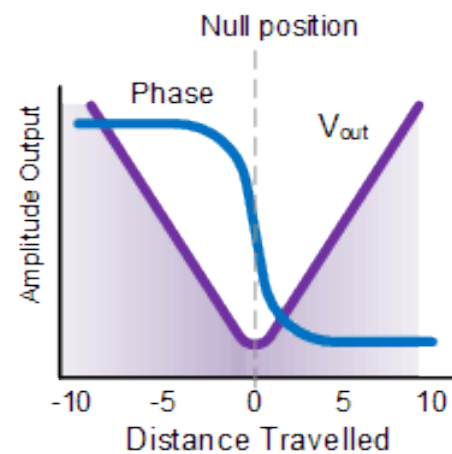
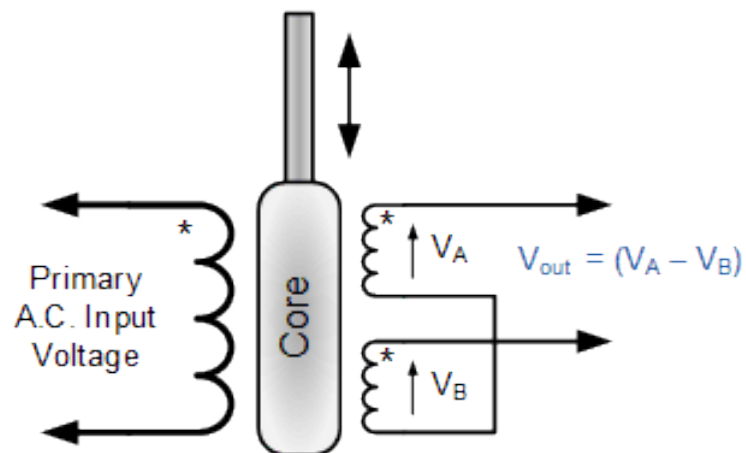
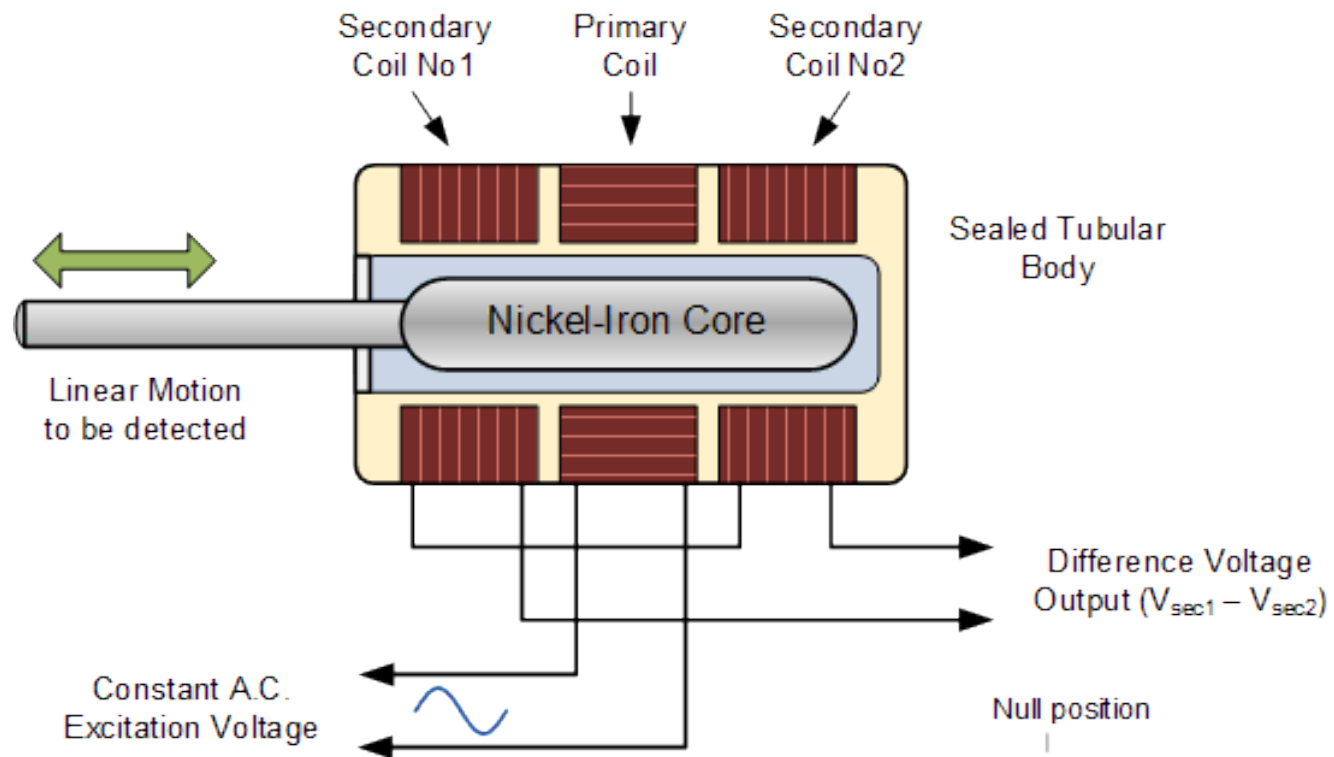
Датчики. Електромагнітна індукція



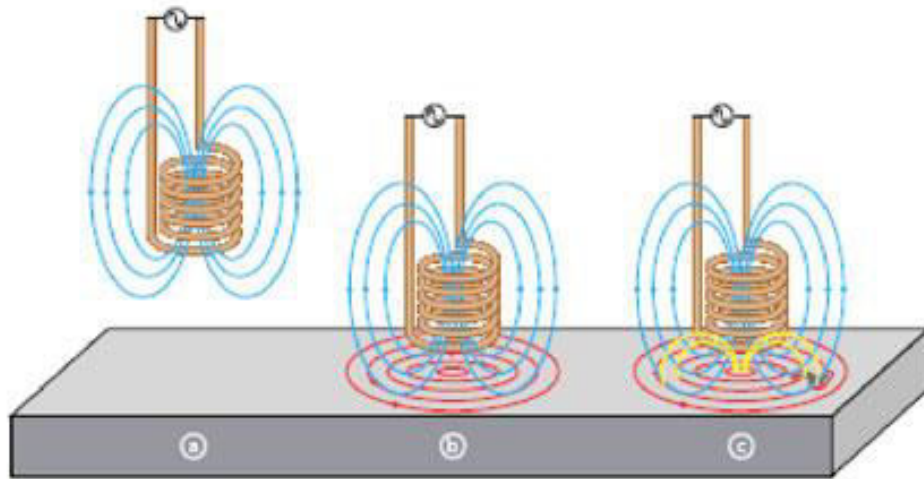
При переміщенні провідника в постійному електромагнітнітному полі виникає е.р.с., пропорційна магнітному потоку і, отже, швидкості його переміщення

Аналогічним чином, коли замкнутий контур піддається впливу змінного магнітного потоку при переміщенні в полі самого контуру або джерела поля (наприклад магніту), індукована в контурі е.р.с. дорівнює за величиною швидкості зміни магнітного потоку.

Вимір е.р.с. електромагнітної індукції дозволяє визначити швидкість переміщення об'єкта, механічно пов'язаного з рухомим елементом подібного датчика.



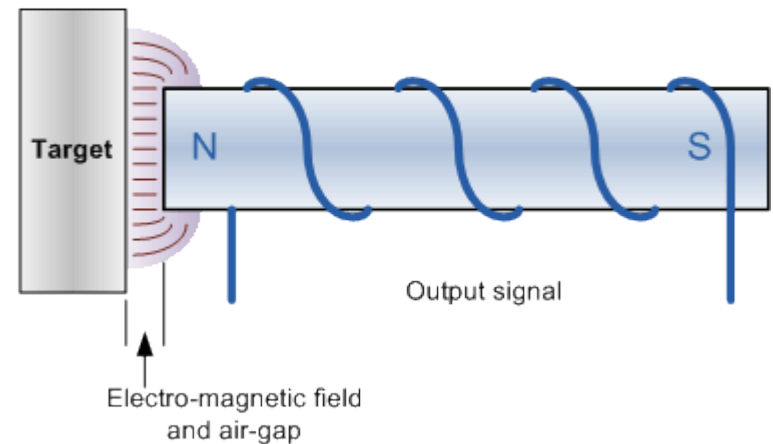
Eddy-Current Sensors

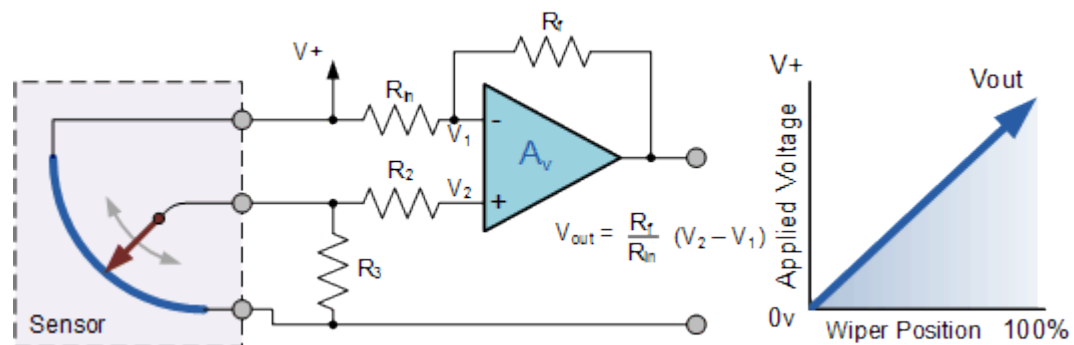
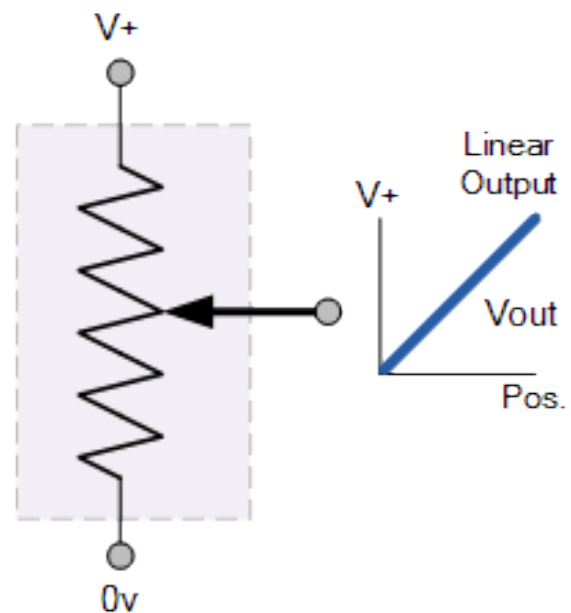
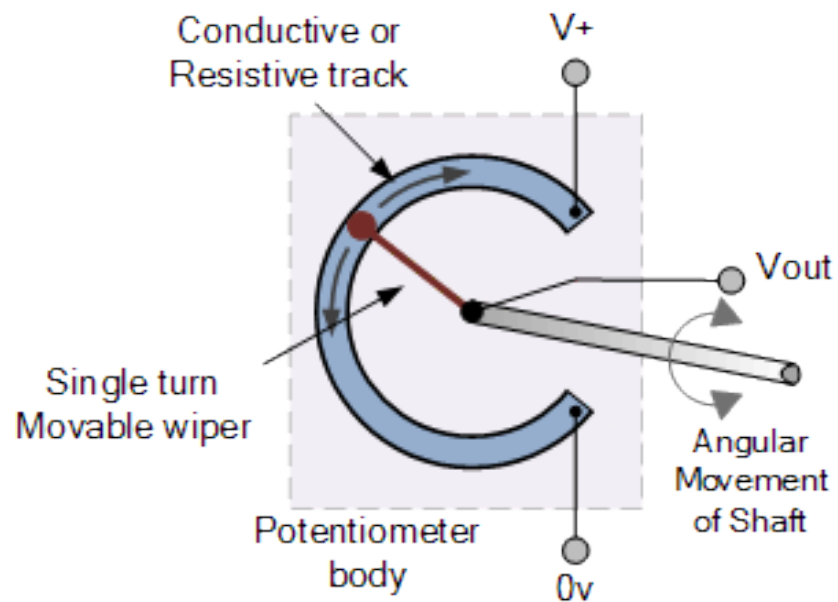


- a—The alternating current flowing through the coil at a chosen frequency generates a magnetic field around the coil.
- b—When the coil is placed close to an electrically conductive material, eddy current is induced in the material.
- c—If a flaw in the conductive material disturbs the eddy current circulation, the magnetic coupling with the probe is changed and a defect signal can be read by measuring the coil impedance variation.



Metallic object
being detected





Датчик кута повороту

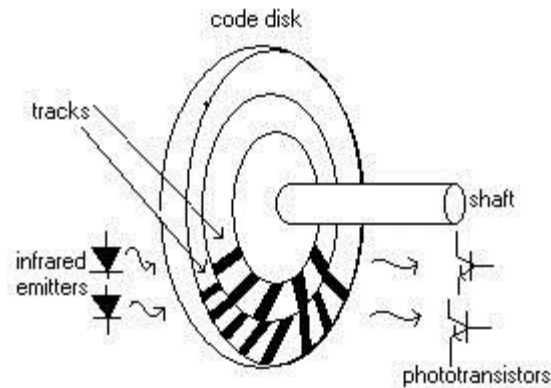
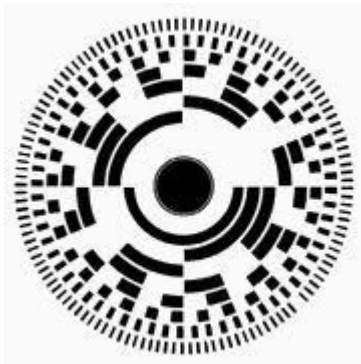


Fig 1 A rotary optical encoder

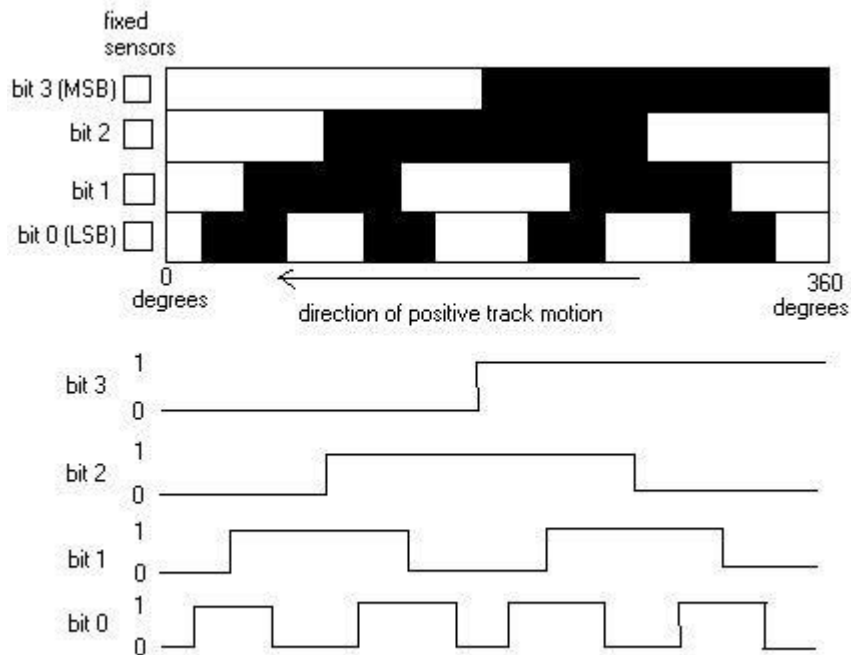
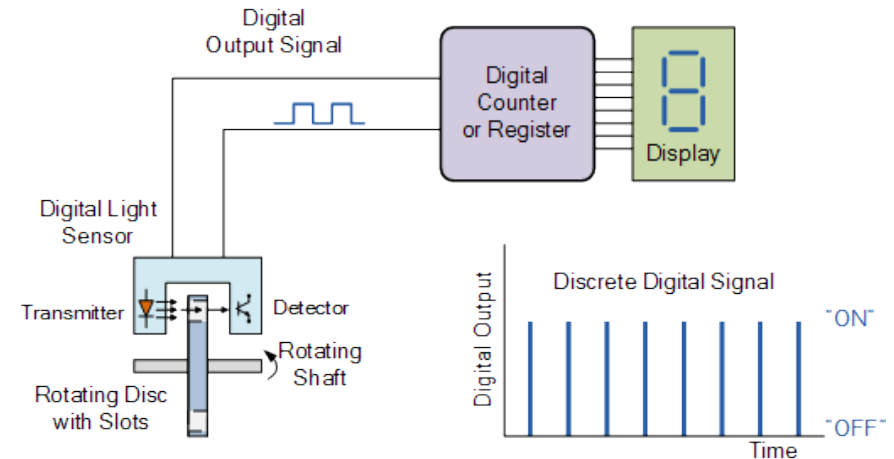
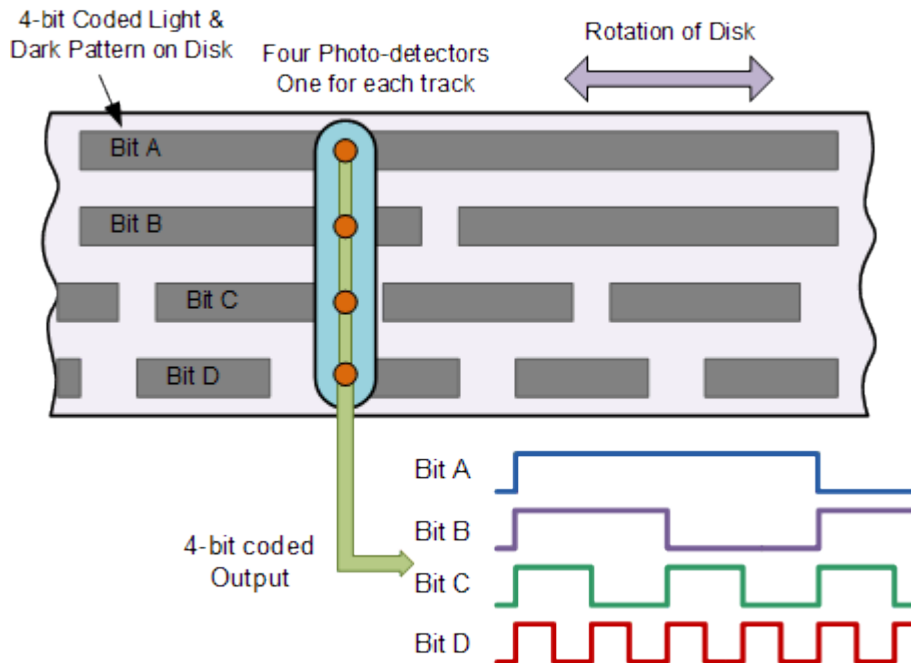
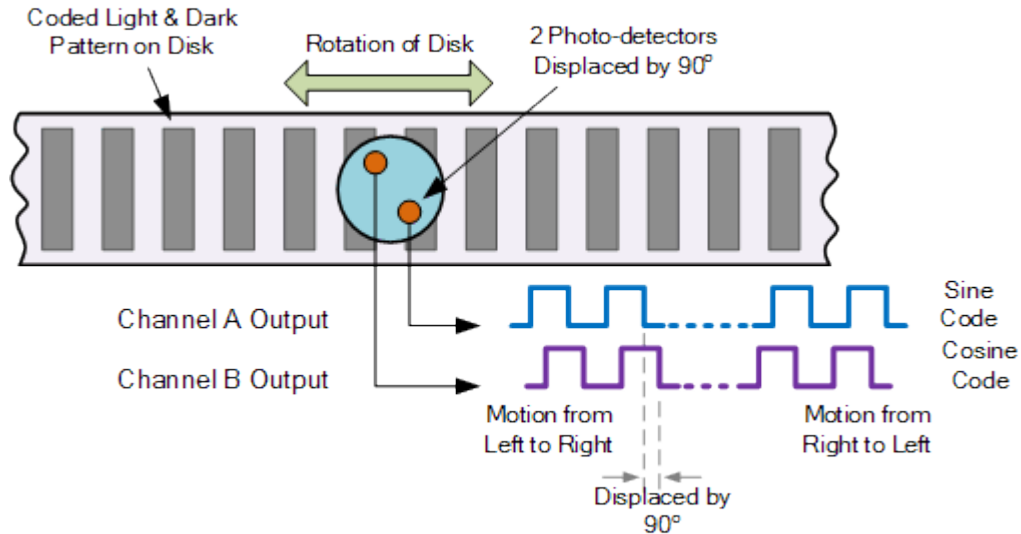
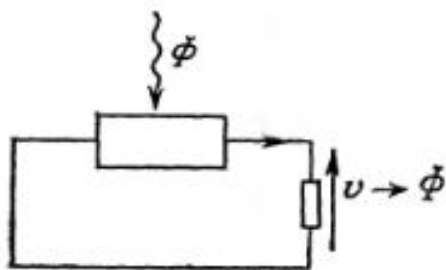


Fig 2. 4-Bit gray code absolute encoder disk track patterns

Датчик переміщення

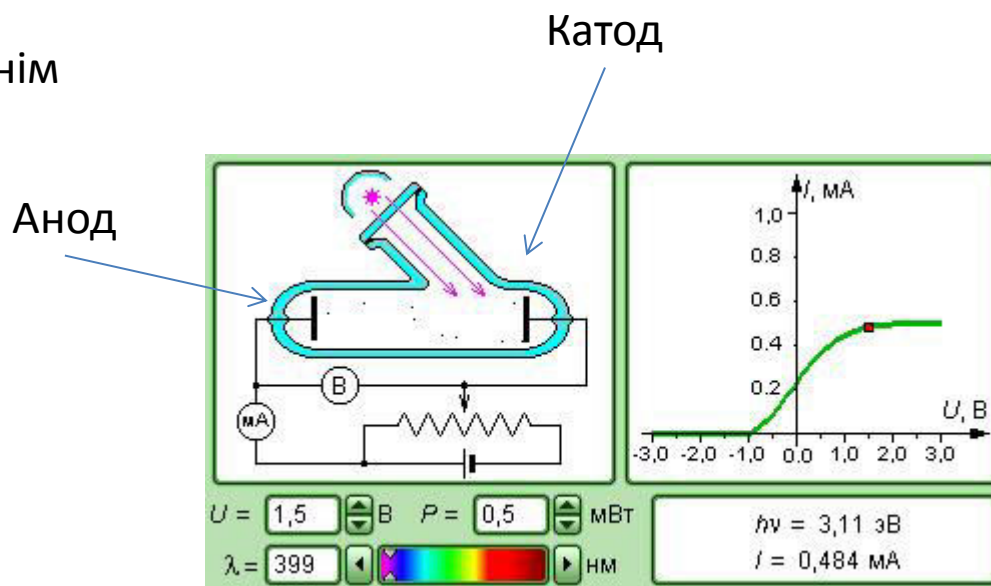


Датчики. Фотоелектричний ефект

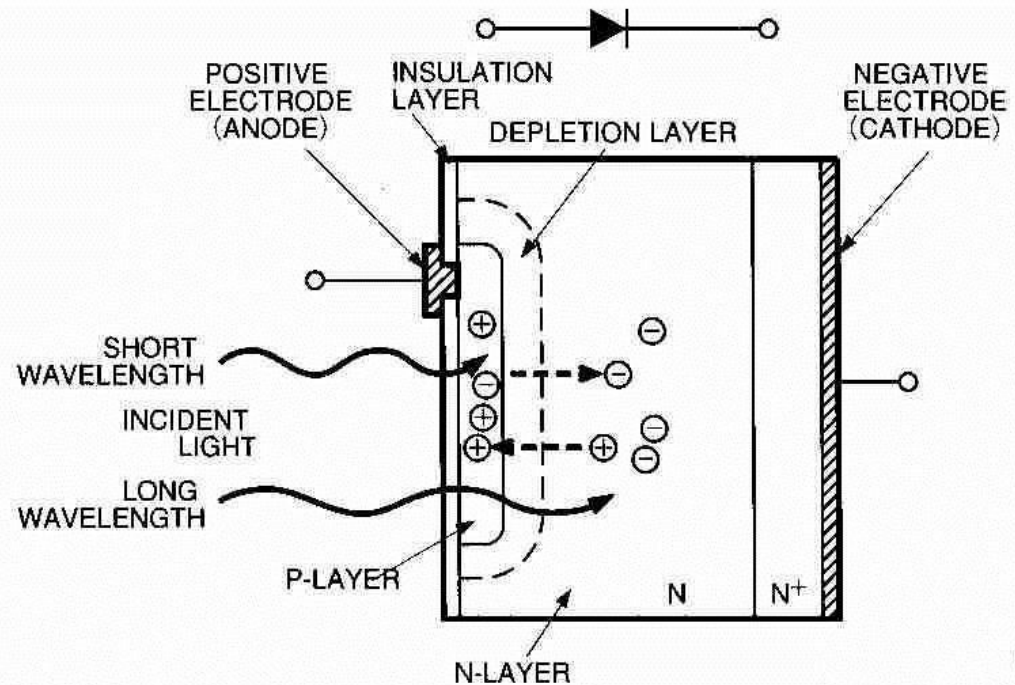
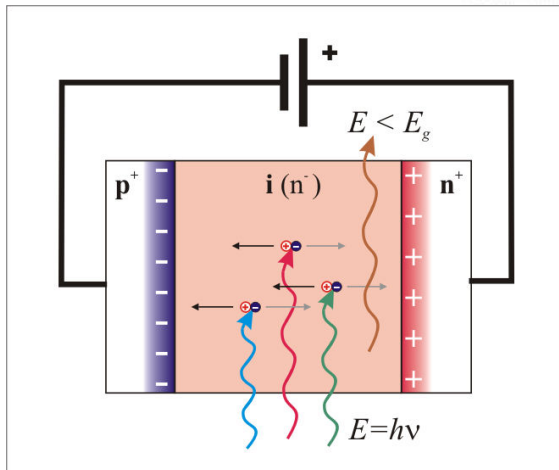


Під дією електричного поля
генеруються вивільняються носії
заряду

Вакуумний фотоелемент з зовнішнім
фотоелементом

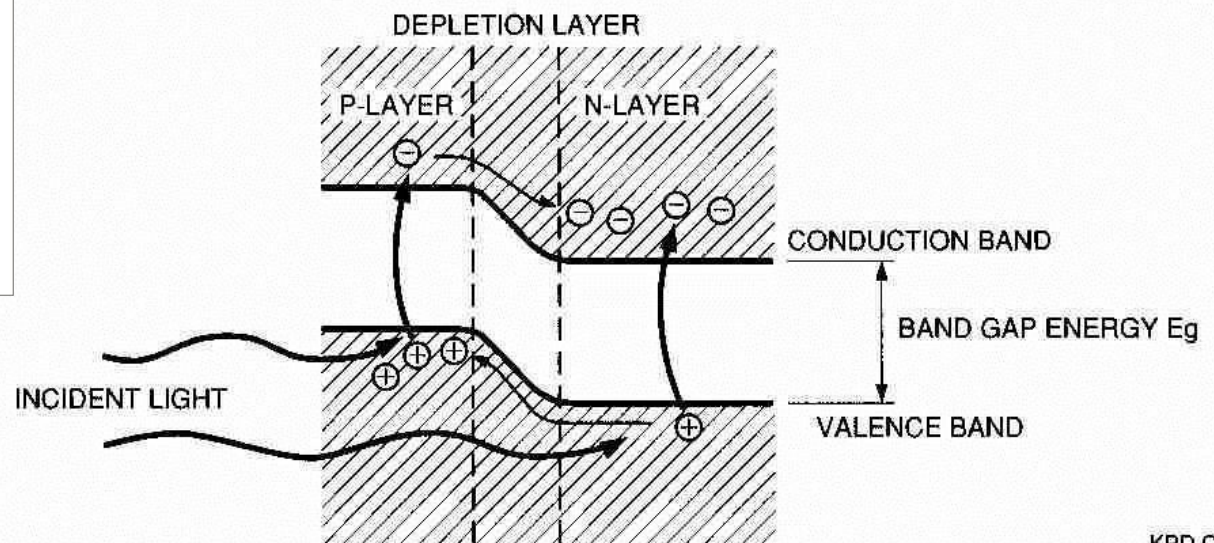


Напівпровідник вий фотодіод з внутрішнім фотоефектом



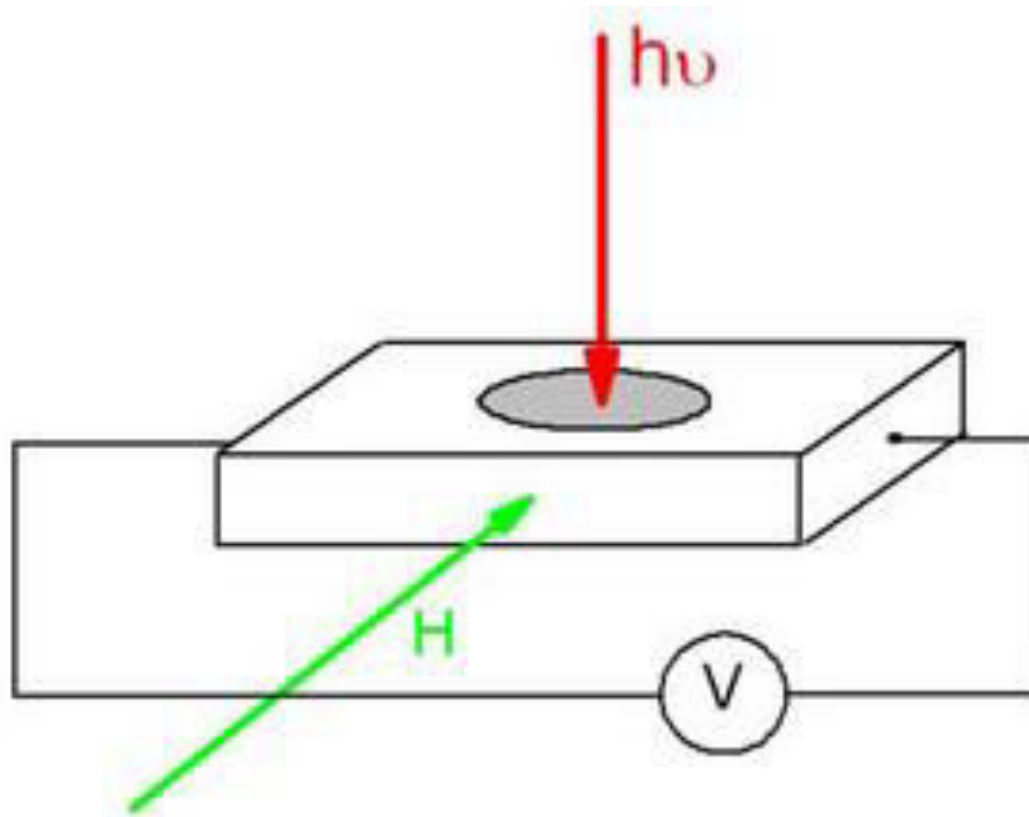
KPD C0002EA

(b): Photodiode P-N Junction State



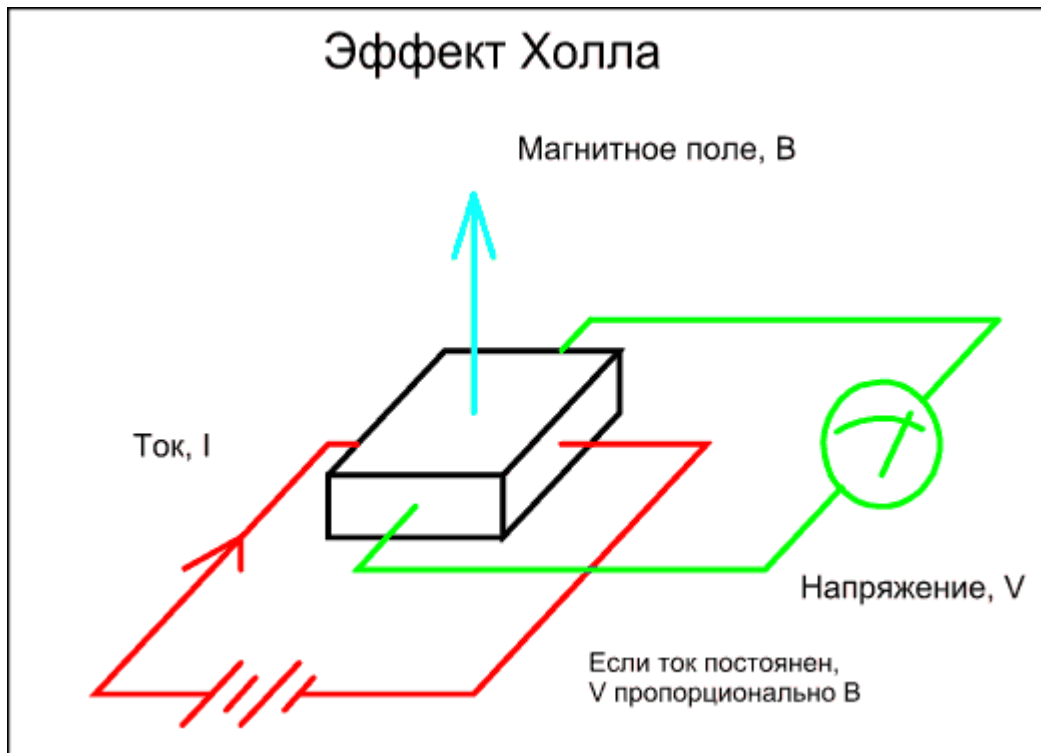
KPD C0003EA

Датчик на основі фотоелектромагнітного ефекту



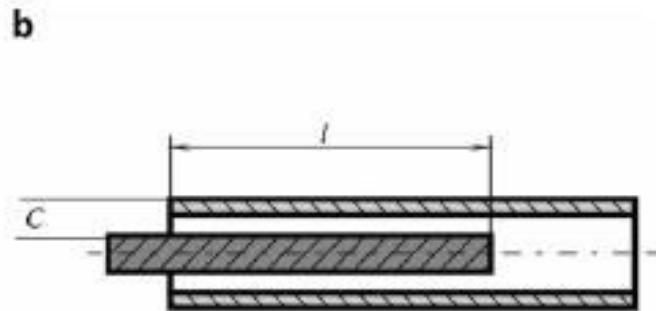
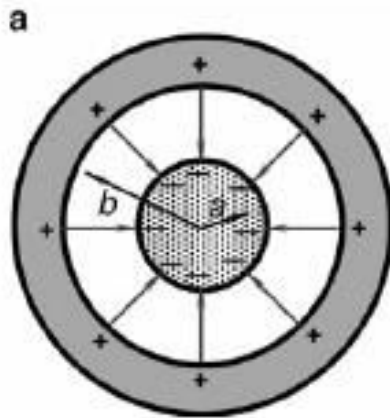
Датчик на основі ефекту Холла

$$v_H = K_H I B \sin \theta$$

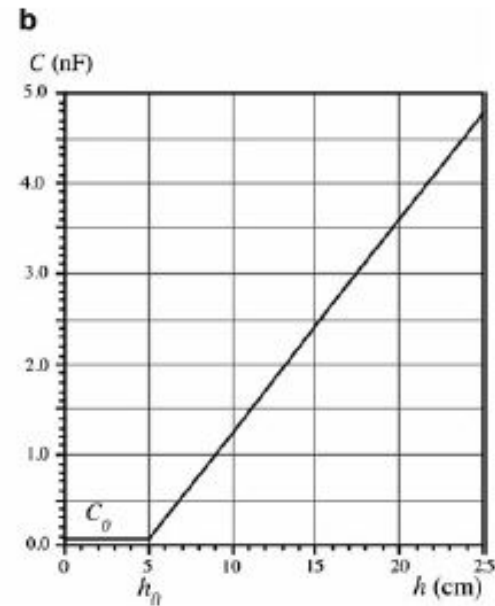
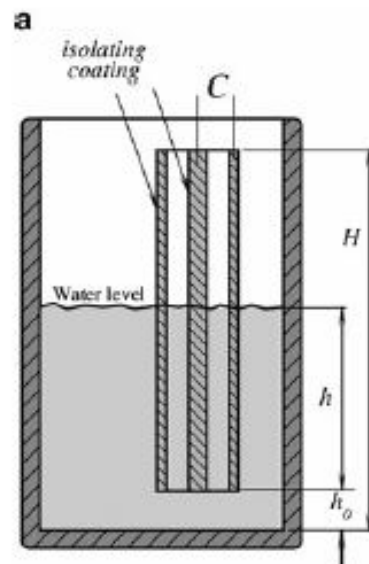


Рухомий об'єкт ->
Рух постійного магніту ->
Зміна напруги хола

Ємністний сенсор

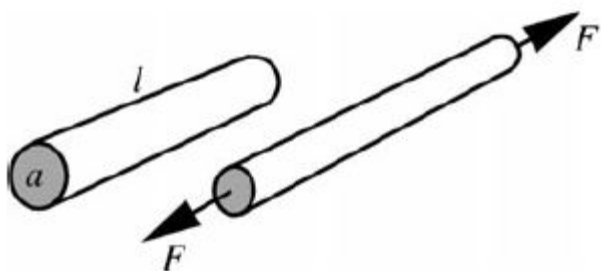


$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{b}{a}}$$



Сенсор натягу

Модуль Юнга



$$\sigma = \frac{F}{a} = E \frac{dl}{l}$$

$$R = \frac{\rho}{v} l^2$$

l – довжина сенсора

a – площа сенсора

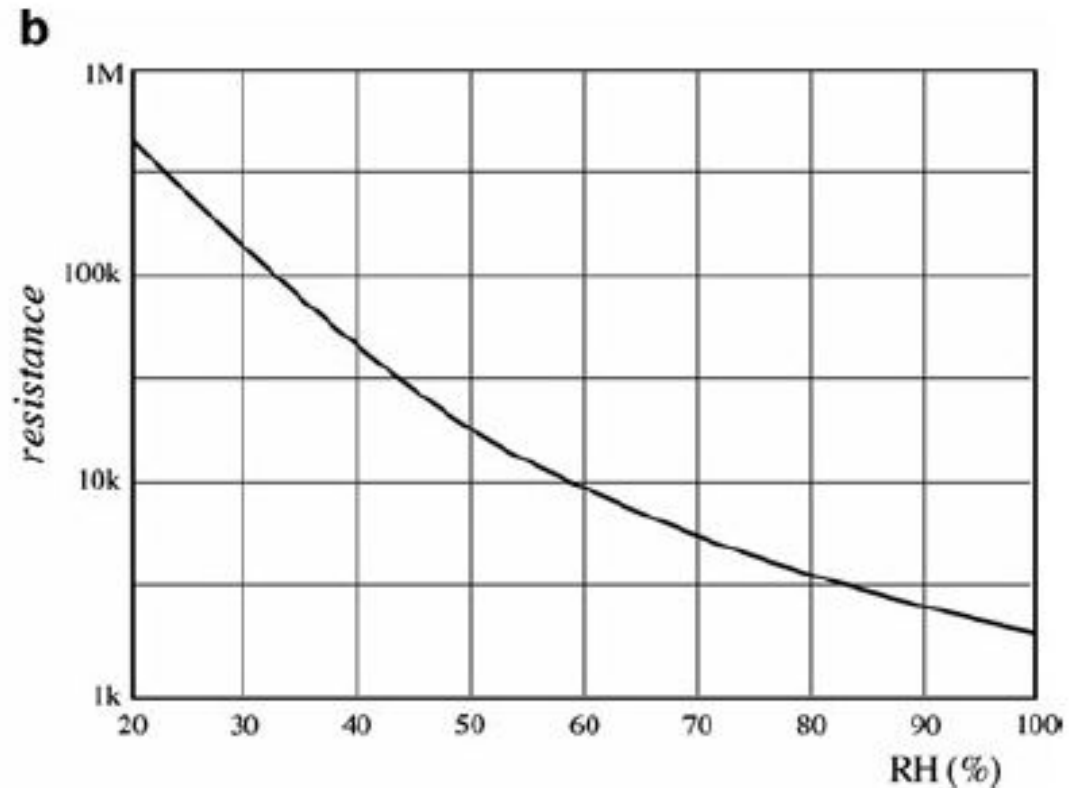
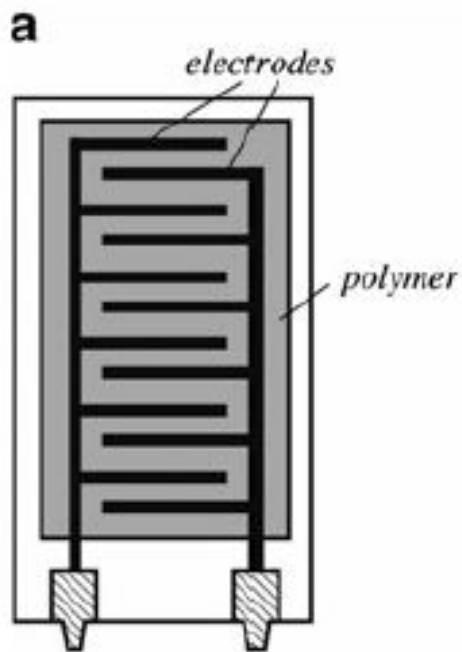
v – об'єм

$$\frac{dR}{dl} = 2 \frac{\rho}{v} l$$

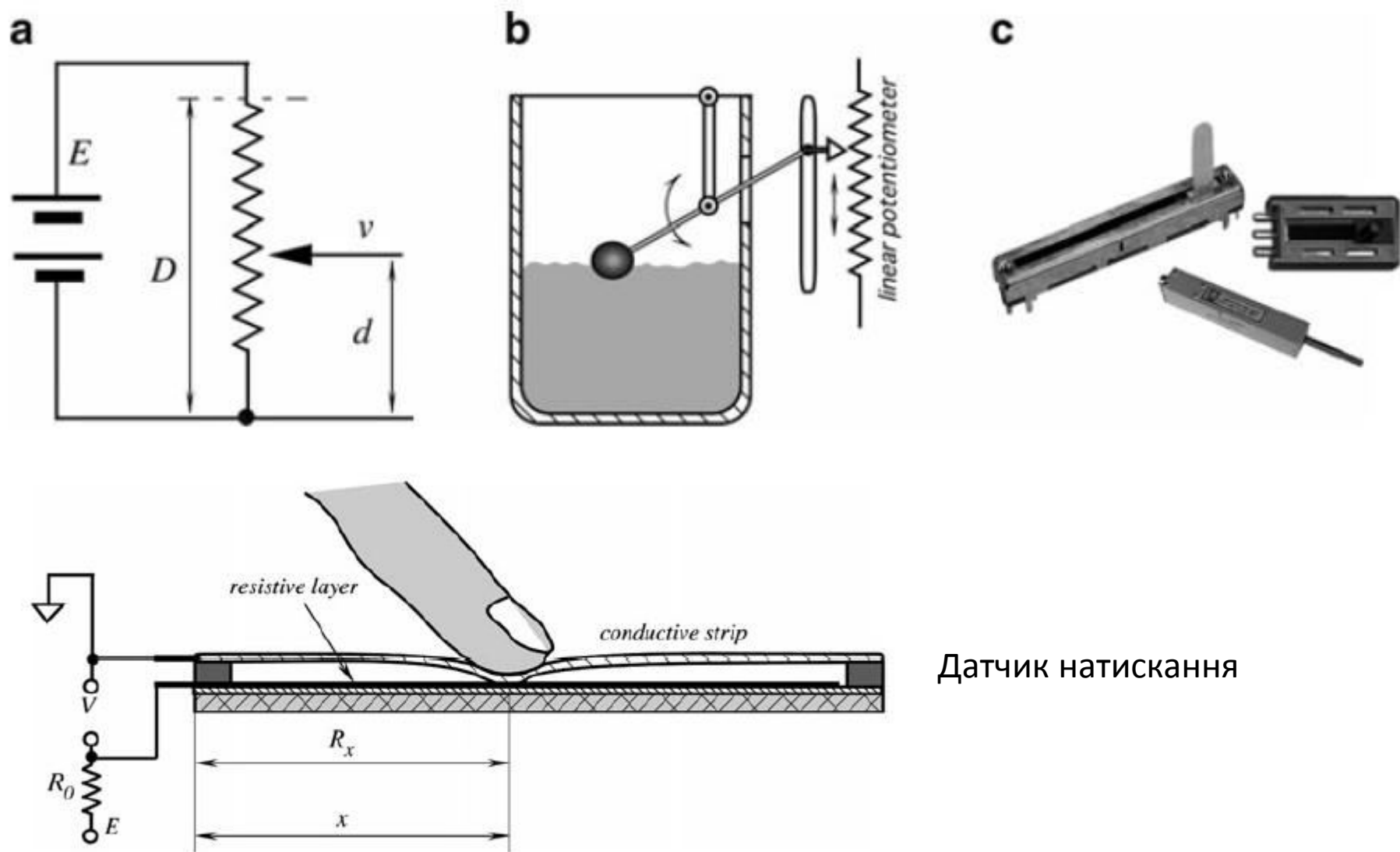
$l \uparrow \quad a \downarrow \quad v = \text{const}$

Датчик вологості

Основа – гідроскопічні матеріали

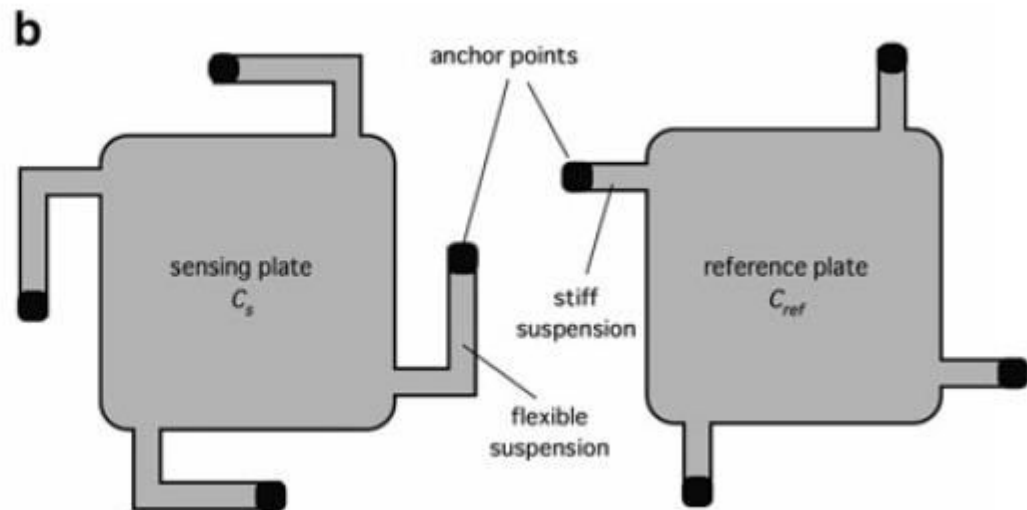
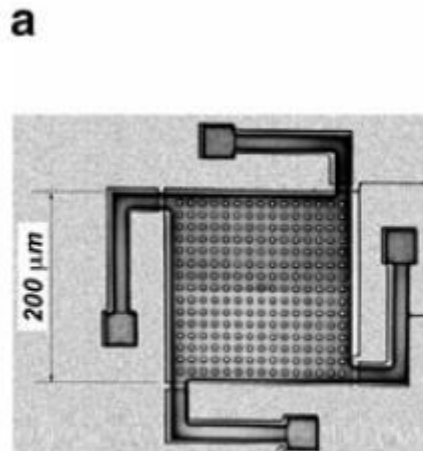
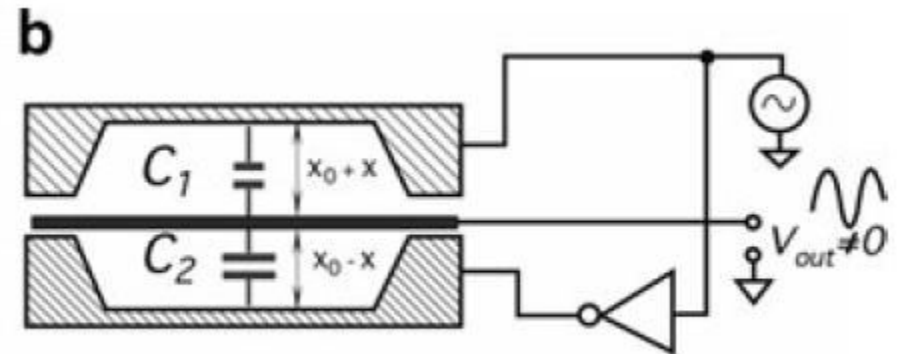
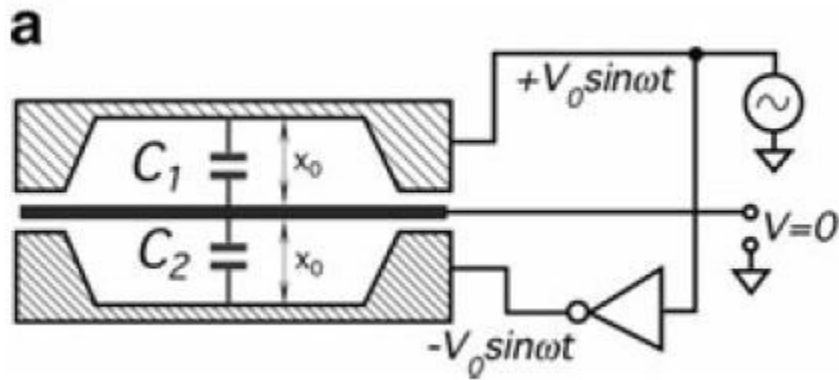


Потенціометричний сенсор



Датчик натискання

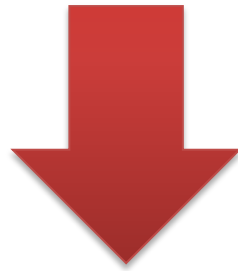
Ємністний сенсор положення



Оптичні сенсори

Пасивні датчики

Величина, що вимірюється



Зміна вихідного імпедансу (комплексний опір)

Імпеданс = f (геометричні розміри, властивості матеріалів)

Питомий опір
Магнітна проникність
Діелектрична постійна
..

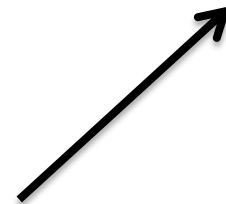


Таблица 1.2. Физические принципы преобразования величин и материалы, используемые для построения пассивных датчиков

Измеряемая величина	Электрическая характеристика, изменяющаяся под действием измеряемой величины	Тип используемых материалов
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля, легированный кремний
Перемещение	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
	Сопротивление	Магниторезистивные материалы: висмут, антимонид индия
Влажность	Сопротивление	Хлористый литий, окись алюминия, полимеры
Уровень	Диэлектрическая проницаемость	Жидкие изоляционные материалы

Схеми підключення пасивних датчиків

Для підключення пасивних датчиків використовують електричні схеми з джерелом живлення і схемою формування сигналу.

Найбільш часто використовуються наступні схеми:

- Потенціометрична схема, що містить з'єднані паралельно джерело напруги і датчик-потенціометр;
- Мостова схема, розбаланс якої характеризує вимірювання імпедансу датчика
- Коливальний контур, що включає в себе імпеданс датчика (при цьому контур є частиною коливального генератора і визначає його частоту)
- Операційний підсилювач, в якому імпеданс датчика є одним з елементів, що визначає коефіцієнт підсилення.

Комбіновані датчики

Величина, що вимірюється



Первинний перетворювач

Проміжна
величина

Вторинний перетворювач



Електрична величина

Механічний зсув

Розтягуюча сила

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \frac{F}{A}$$

Модуль Юнга

Зміна опору резистивного датчика

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{Y} \frac{F}{A}$$

Класифікація та загальні характеристики
перетворювачів.

Силові елементи.

Резистивні перетворювачі

Ємнісні перетворювачі

Індуктивні перетворювачі

Оптичні перетворювачі

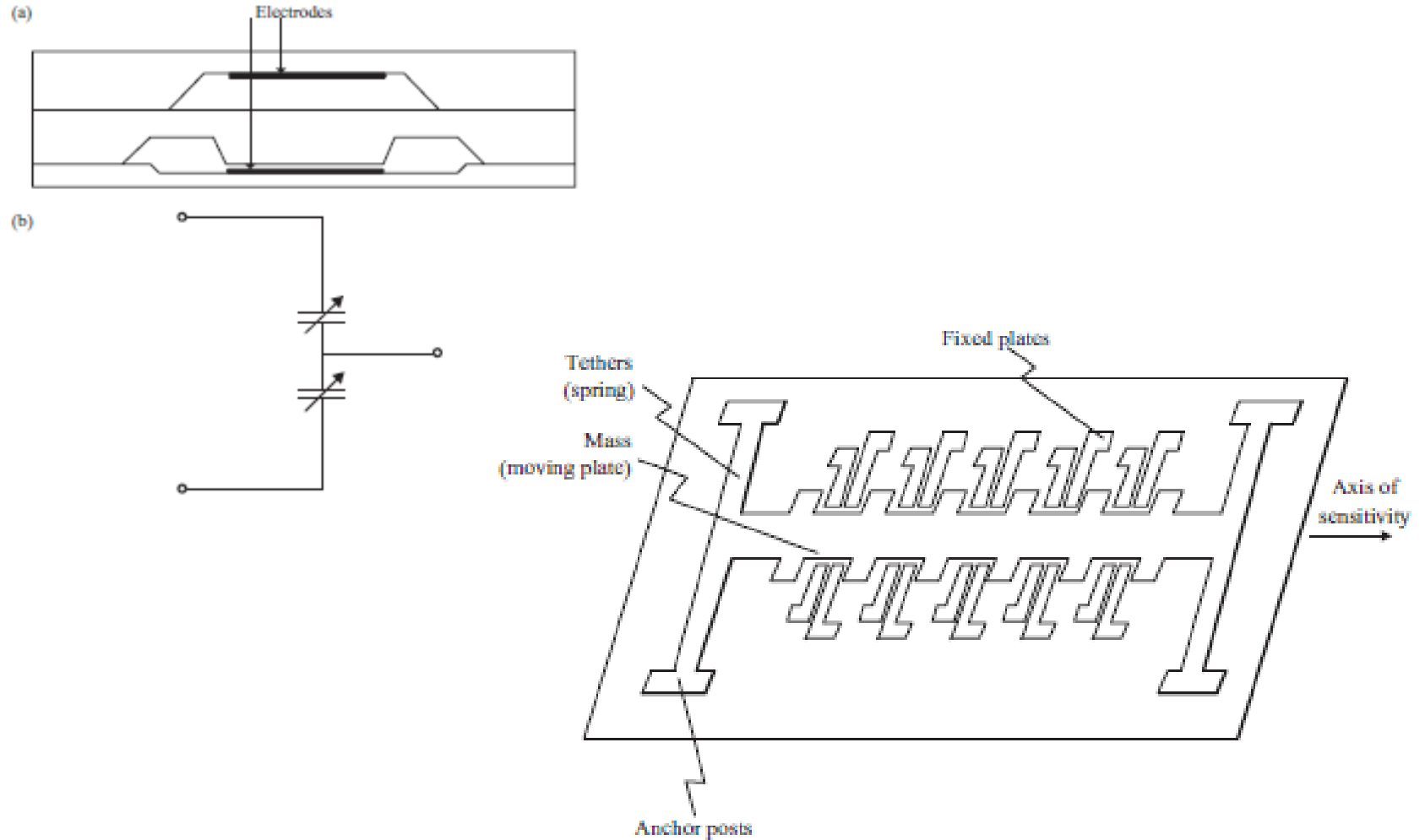
П'єзоелектричні перетворювачі

Термодатчики.

Перетворювачі на ефектах Холла та Пельт'є.

Крокові двигуни

Ємністний сенсор



Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых веществ

Вещество	Удельное сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-3}град^{-1}
Алюминий	0,028	
Вольфрам	0,055	4,2
Железо	0,098	6
Золото	0,023	
Константан	0,44-0,52	0,02
Латунь	0,025-0,06	
Манганин	0,42-0,48	
Медь	0,0175	4,1
Молибден	0,057	
Никелин	0,39-0,45	0,3
Никель	0,100	
Нихром	1,1	0,15

Дво-дротовий трансмітер

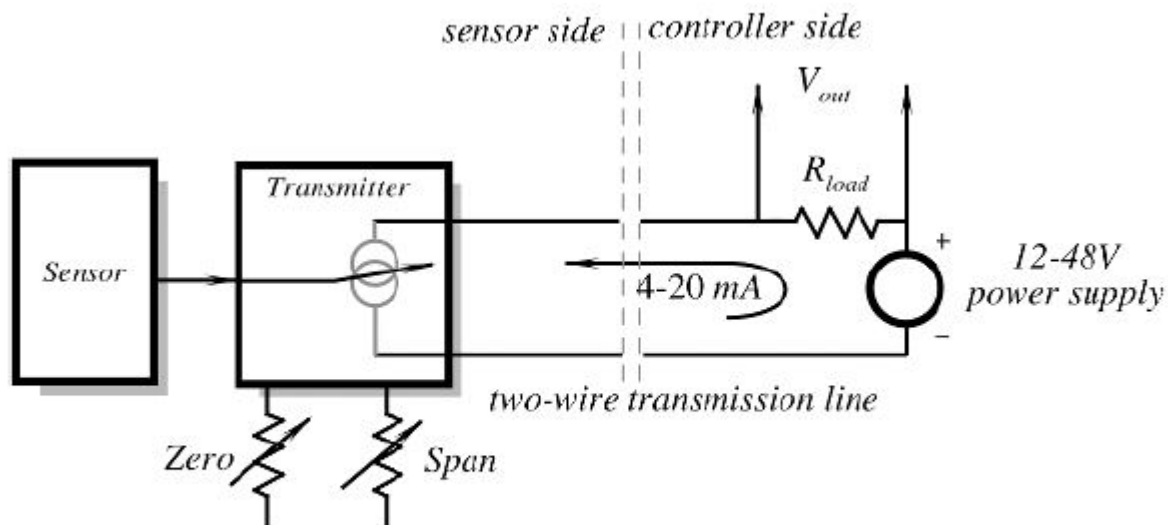


Fig. 5.42. Two-wire 20-mA analog data transmission.

Контрольований перетворювач Сигнал (можливо не електричний) → струм

Зміна
“фізичного”
сигналу
 $S_{min}..S_{max}$

Сенсор

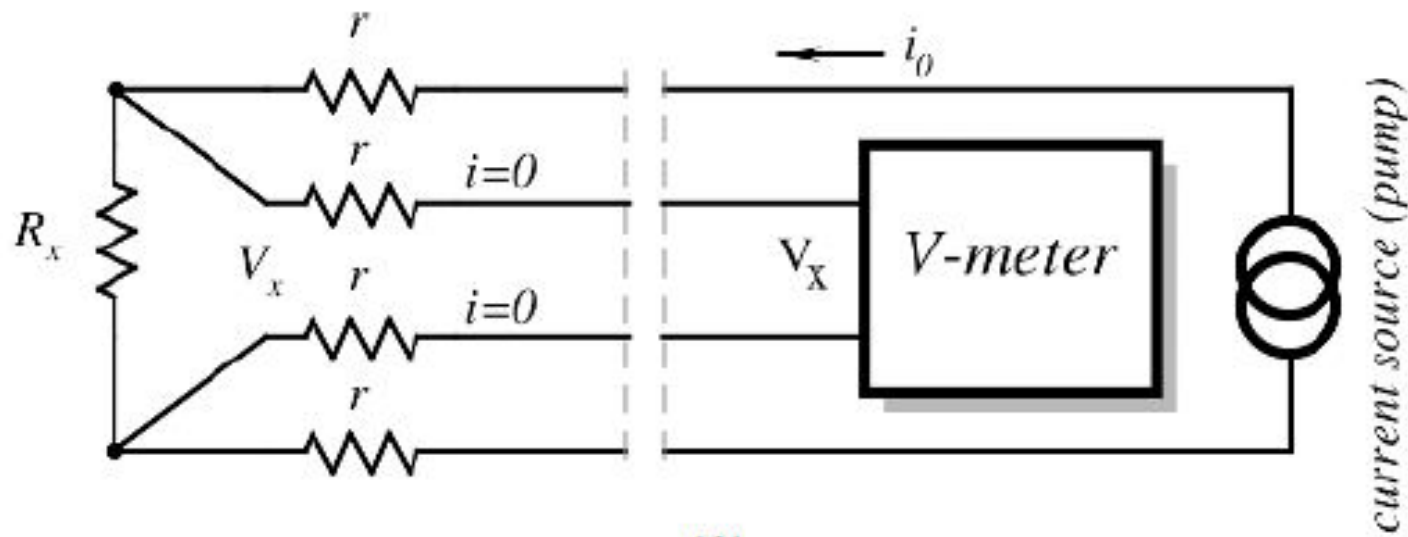
Зміна
внутрішнього
опору

$R_{min}...R_{max}$

$I_{min}..I_{max}$

$U_{min}..U_{max}$

$$V_x = R_x i_0,$$

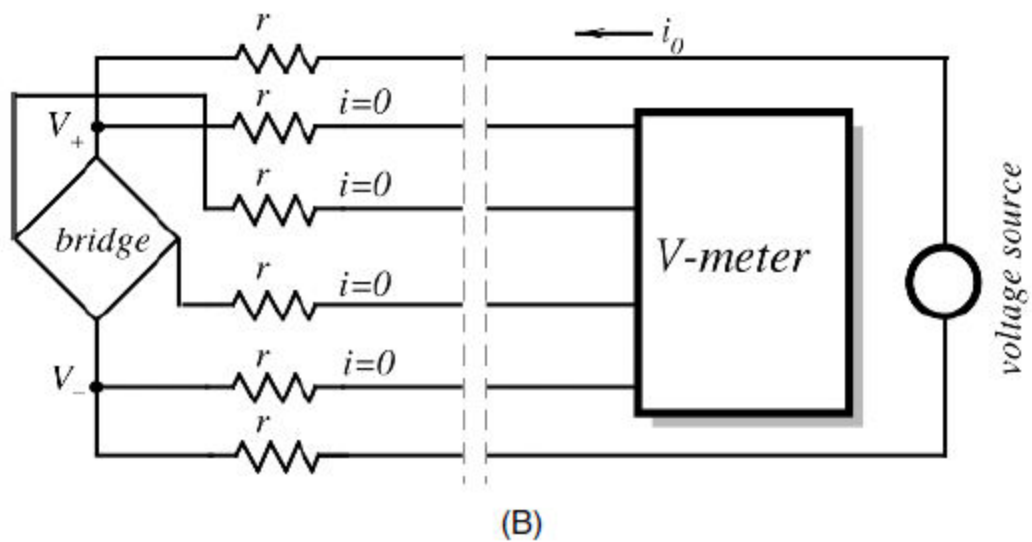
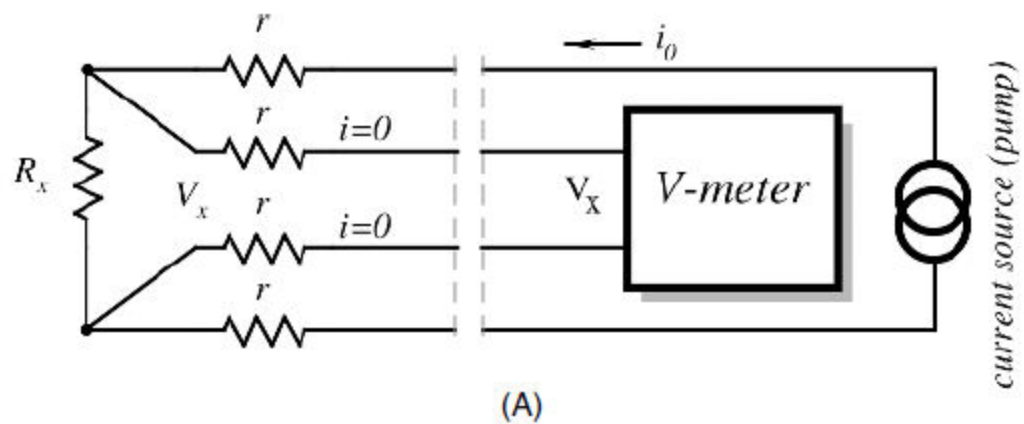


Гальваностат

R_{out} (джерела струму) $\rightarrow \infty \Rightarrow i_0 \neq f(r)$

R_{in} (вольтметра) $\rightarrow \infty \Rightarrow i=0$

$$V_x = R_x i_0,$$



Шуми

Джерела струму

Сигнал

Noise Source
Power supply transients
Magnetic
Electrostatic
Radiofrequency EM fields
Thermal variations
Gravitational force
Acceleration (Vibration)
Humidity
Ionizing radiation
Chemical agents

Coupling

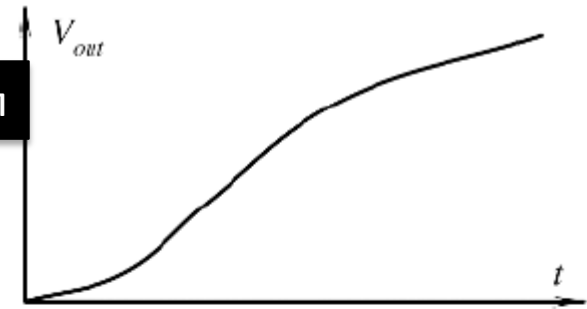
Capacitance
Magnetic field
Wires
Packaging

Receiver

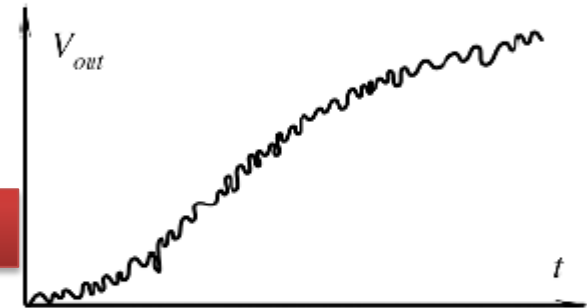
Sensing Element
Resistors
Capacitors
Preamplifier

Сигнал + адитивний шум

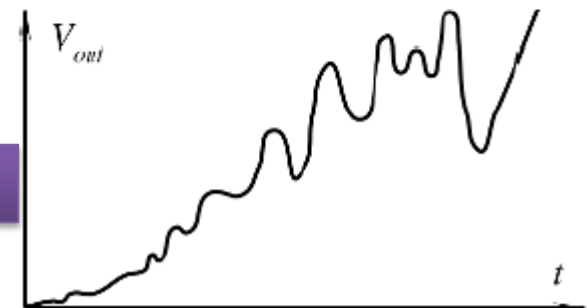
Сигнал + мультиплікативний шум



(A)



(B)

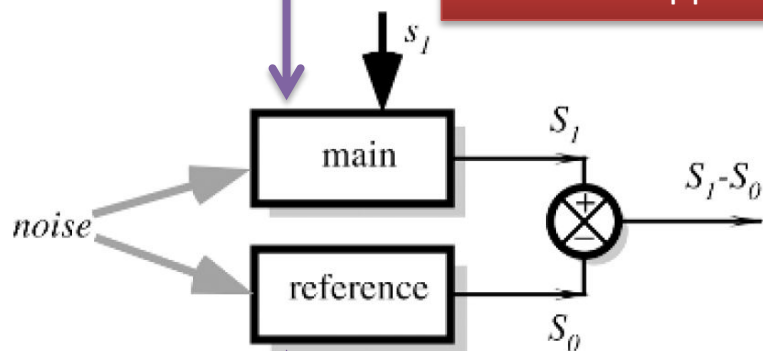


(C)

Диференціальна техніка зменшення рівня адитивних шумів

Задача: зменшити шуми передачі сигналу (*transmitted noise*)

Сенсор, що здійснює вимірювання



Сигнал + адитивний шум (АШ1) = S_1

Сигнал без наведеного шуму в лініях передачі

АШ1 = АШ2
АШ1 в фазі з АШ2

Адитивний шум (АШ2) = S_0

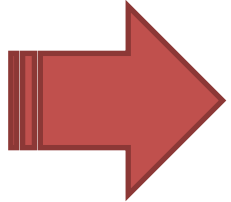
Екранований сенсор (не здійснює вимірювання)

!! Шуми всередині сенсора не зникли !!

Зменшення мультиплікативного шуму

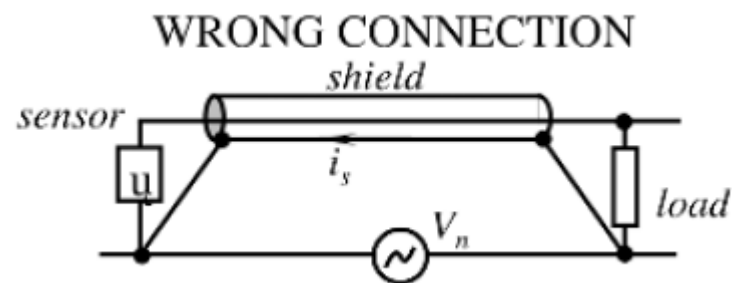
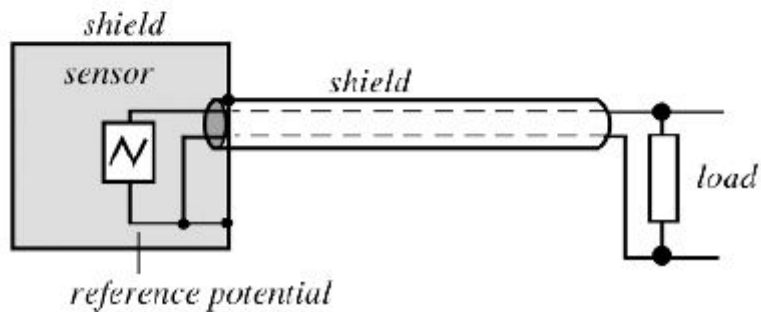
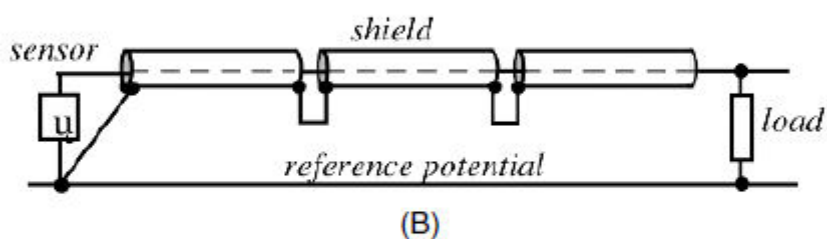
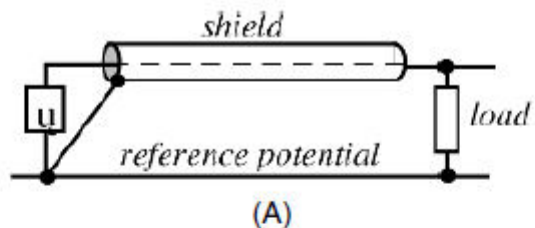
$$V_1 \approx [1 + \alpha(T - T_0)]f(s_1)$$
$$V_0 \approx [1 + \alpha(T - T_0)]f(s_0)$$

↑
Реферативна частина сенсора
при певному постійному
значенню стимулюючого сигналу

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{1}{\underbrace{f(s_0)}_{\text{Const}}} f(s_1)$$

$$\neq f(T)$$

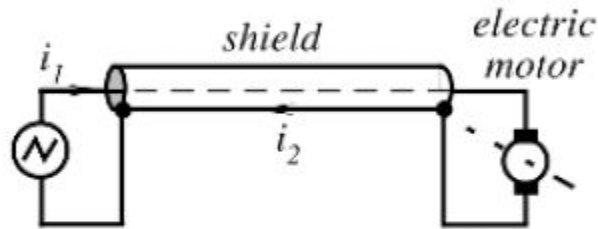
Якщо присутній адитивний і мультиплікативний шум то техніки не працюють

Електричне Екранування

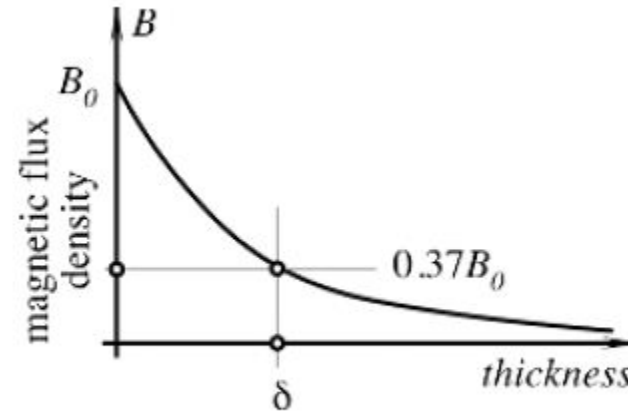


Потенціал на початку і на кінці може бути різний =>Струм

Магнітне екранування



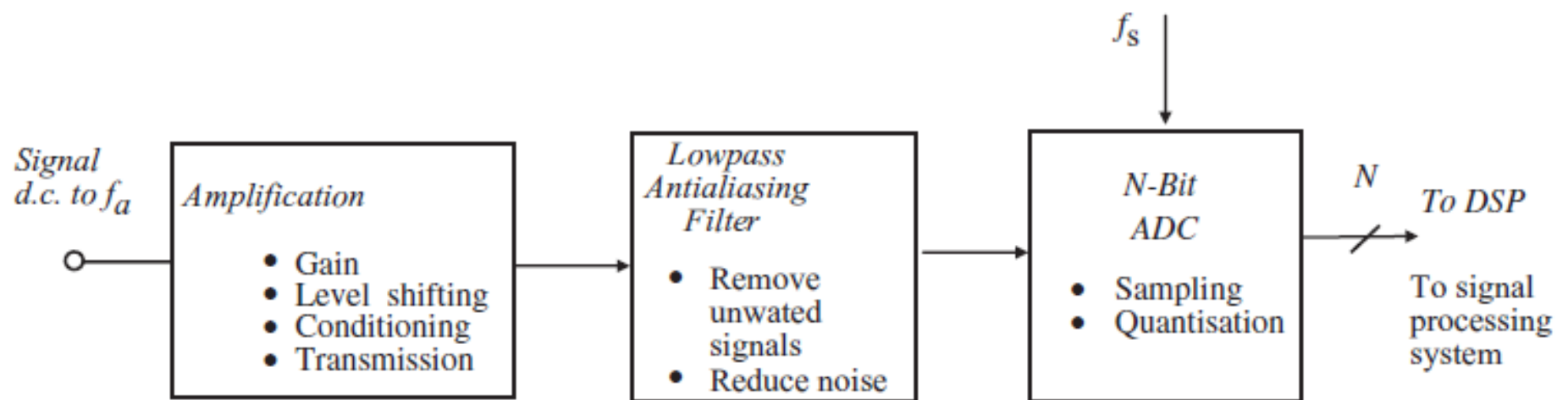
(A)

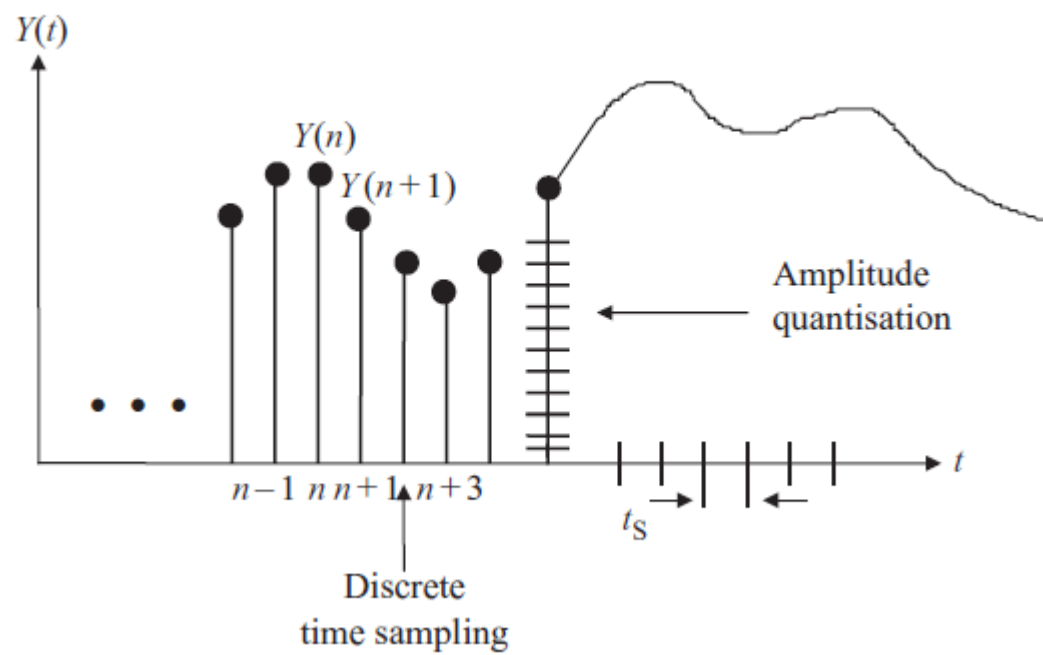


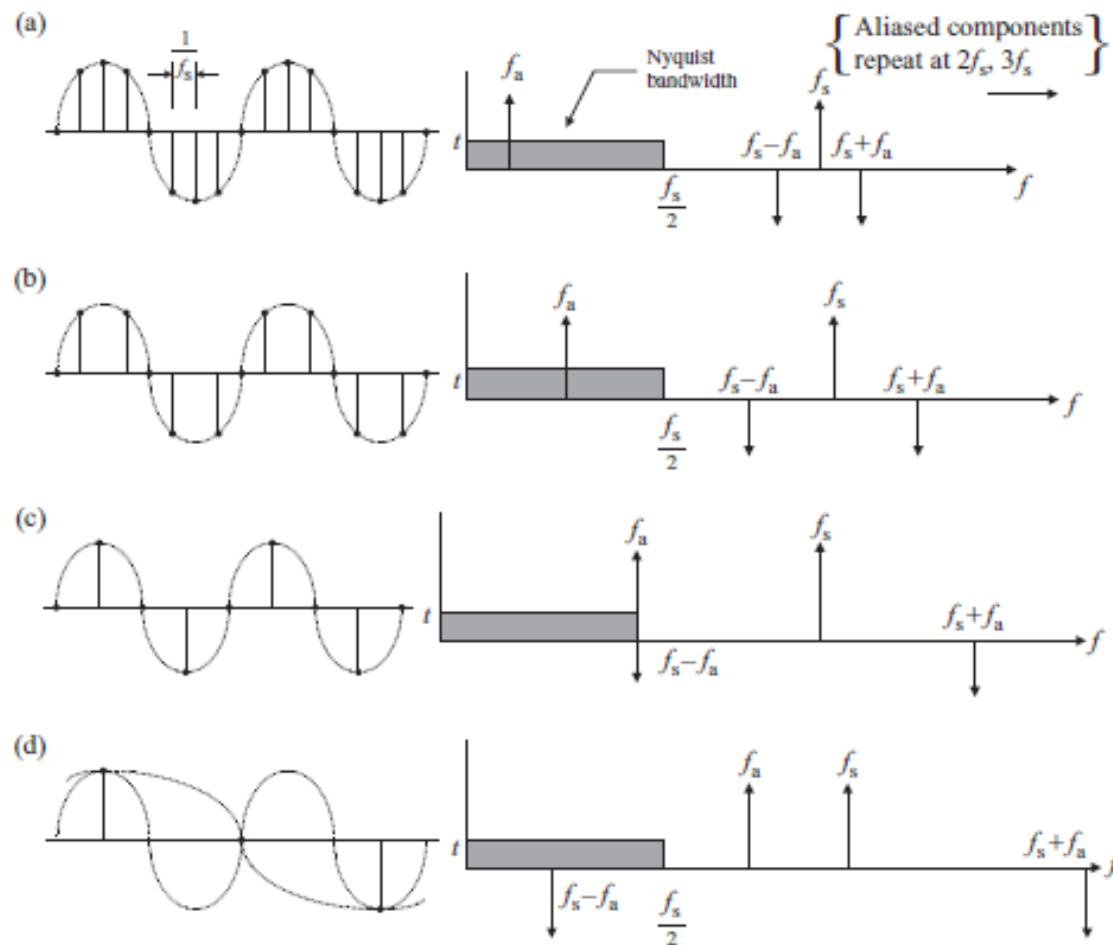
(B)

Table 5.5. Skin Depth, δ , (in mm) Versus Frequency

Frequency	Copper	Aluminum	Steel
60 Hz	8.5	10.9	0.86
100 Hz	6.6	8.5	0.66
1 kHz	2.1	2.7	0.20
10 kHz	0.66	0.84	0.08
100 kHz	0.2	0.3	0.02
1 MHz	0.08	0.08	0.008







Параметри сигналу

Signal	Primary parameters	Secondary parameters
Sinusoidal waveforms	Amplitude Peak Peak to peak r.m.s. Average Frequency	Harmonic distortion
Square wave	Amplitude Peak Peak to peak r.m.s. Average Frequency Mark space ratio	Rise time Fall time Pulse width Duty cycle Overshoot Undershoot Pulse drop Slew rate
Pulse train	Amplitude Baud rate (bits s^{-1})	Rise time Fall time Pulse width Duty cycle Overshoot Undershoot Pulse droop
Saw tooth wave	Periodic time, Max amplitude	Linearity
DC signal	Amplitude	Ripple
Digital data	Baud rate	Bit error rate

Середнє квадратичне

$$V_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt.$$

**Середнє квадратичне
root mean square**

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T v^2(t) dt \right)}$$

r.m.s (змінний струм) → тепло = тепло на постійному струмі

**rectified mean or mean absolute deviation
середнє абсолютне відхилення**

$$V_{\text{mad}} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt$$

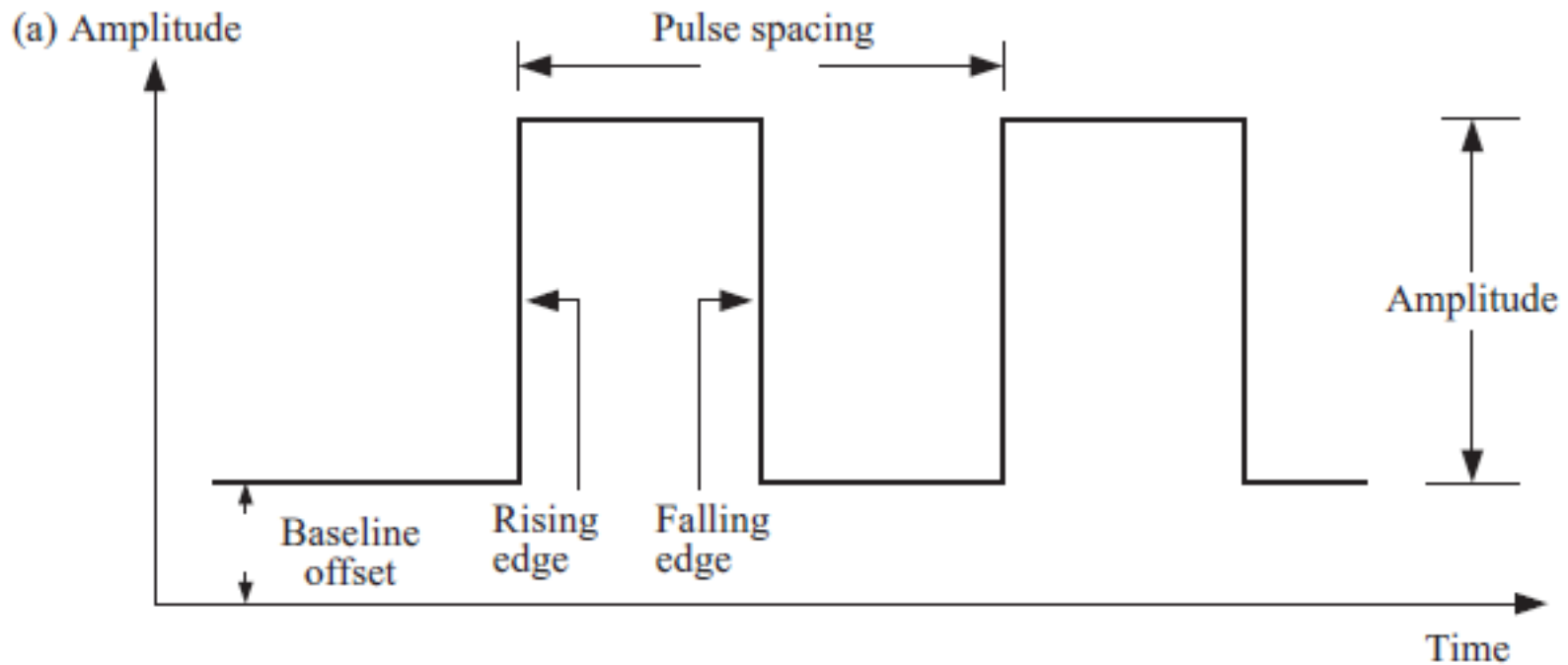
**Коефіцієнт форми
Crest factor**

$$C = \frac{|x|_{\text{peak}}}{x_{\text{rms}}}$$

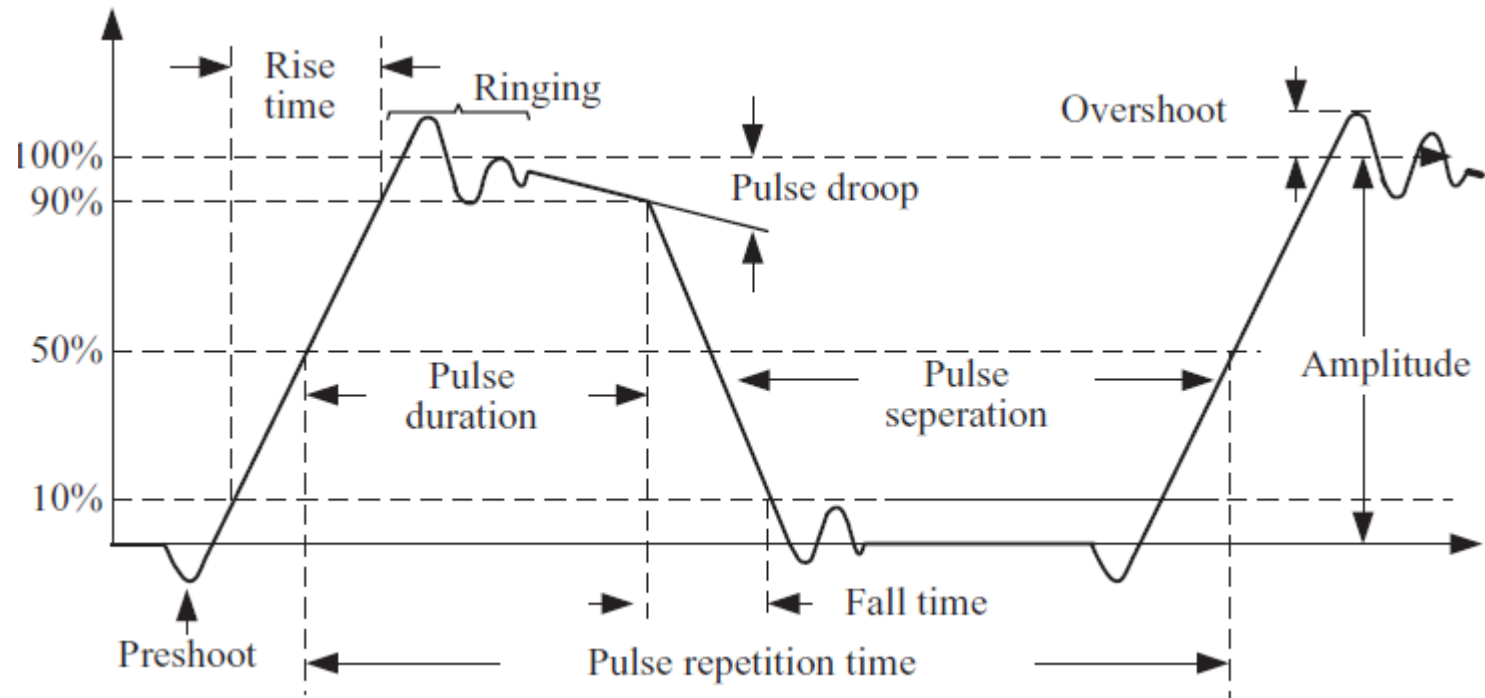
**Форм фактор
Form factor**

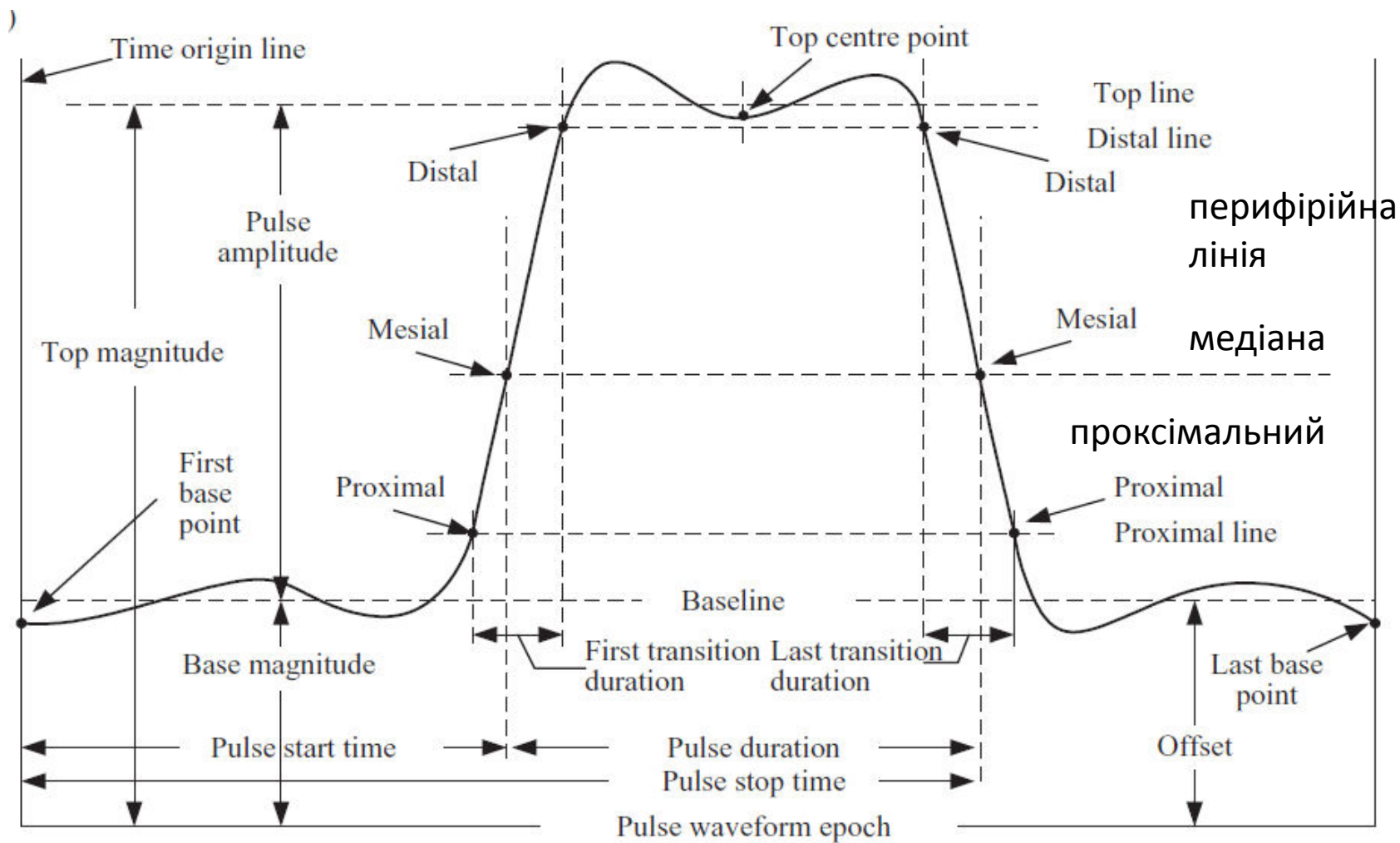
$$k_f = \frac{RMS}{ARV}$$

Ідеальний імпульс

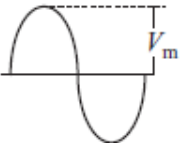
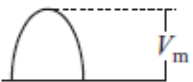

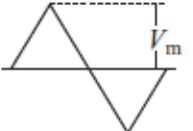
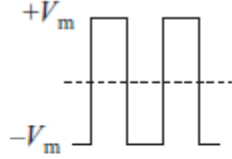
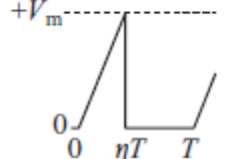


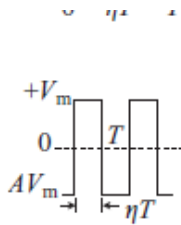
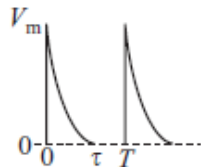
Реальна послідовність імпульсів

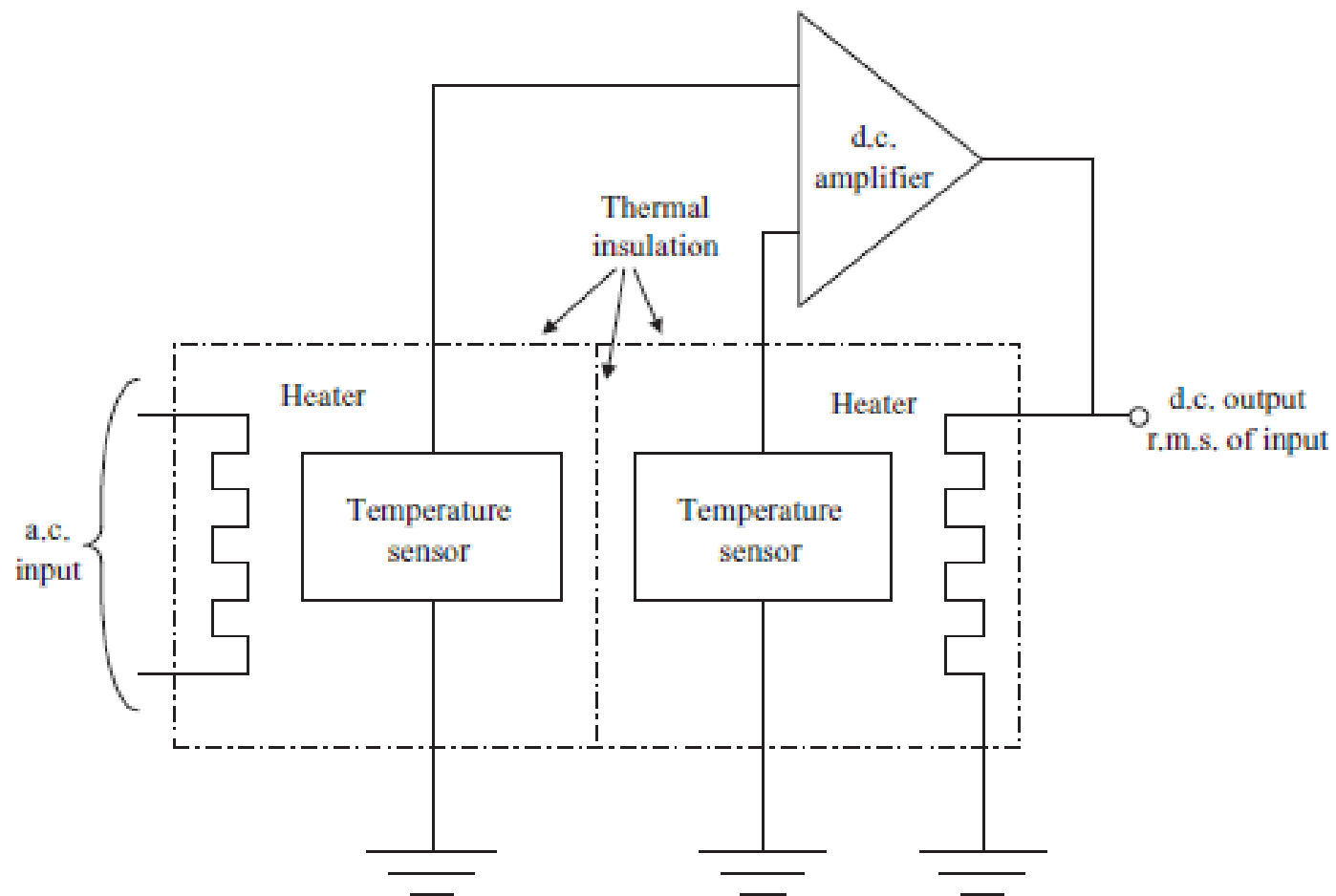




r.m.s - середньоквадратичне

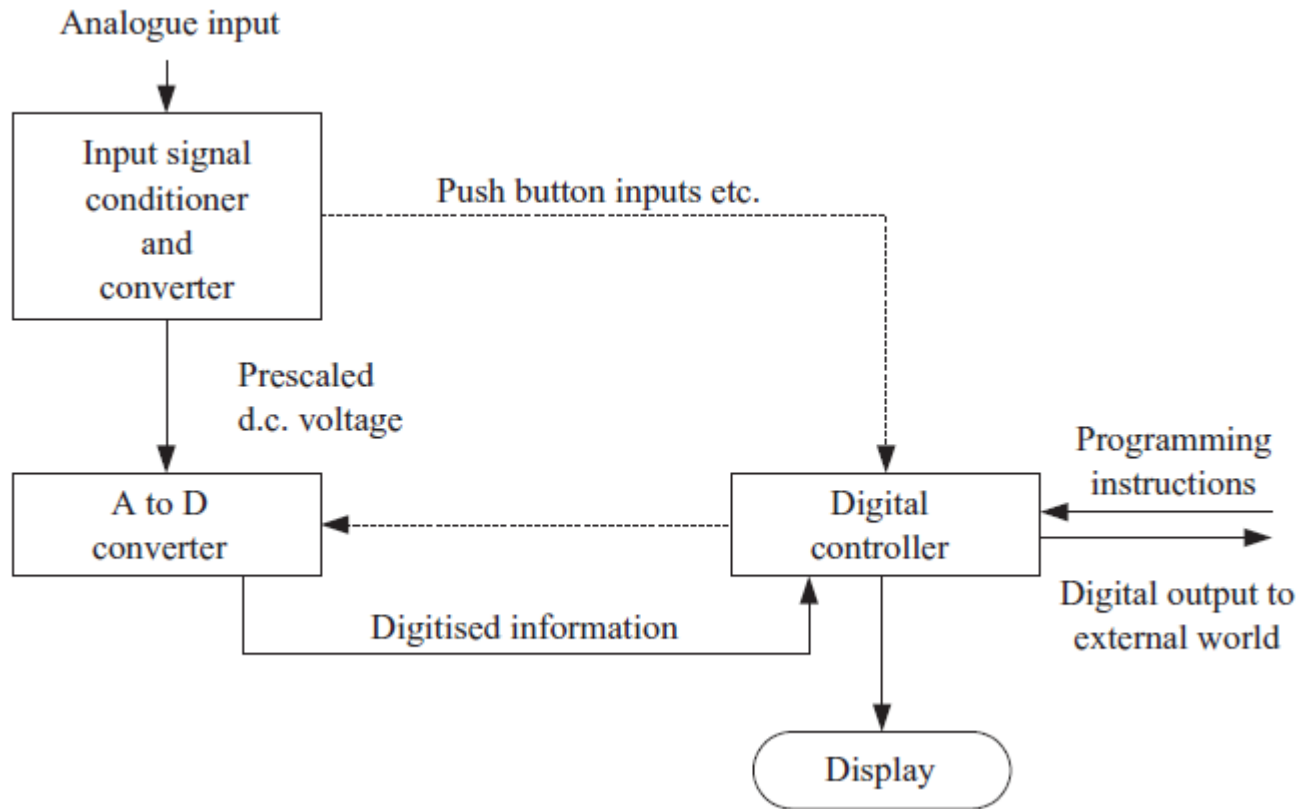
Waveform		r.m.s.	m.a.d.	r.m.s./m.a.d.	Crest factor
	Sinewave	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ $0.707 V_m$	$\frac{2}{\pi} V_m$ $0.637 V_m$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ 1.111	$\sqrt{2}$ 1.414
	Half wave rectified sinewave	$\frac{V_m}{2}$ $0.5 V_m$	$\frac{1}{\pi} V_m$ $0.318 V_m$	$\frac{\pi}{2}$ 1.571	2
	Full wave rectified sine	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ $0.707 V_m$	$\frac{2}{\pi} V_m$ $0.637 V_m$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ 1.111	$\sqrt{2}$ 1.414
	Triangular wave	$\frac{V_m}{\sqrt{3}}$ $0.577 V_m$	$\frac{V_m}{2}$ $0.5 V_m$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ 1.154	$\sqrt{3}$ 1.732
	Amplitude symmetrical rectangular	V_m	V_m	1	1
	Saw tooth pulse	$\sqrt{\frac{\eta}{3}} V_m$	$\frac{\eta}{2} V_m$	$\sqrt{\frac{4}{3\eta}}$	$\sqrt{\frac{3}{\eta}}$

Waveform	r.m.s.	m.a.d.	r.m.s./m.a.d.	Crest factor	
	Offset pulse	$V_m \sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}$	$V_m [\eta(1 - A) + A]$	$\frac{\sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}}{\sqrt{[\eta(1 - A) + A]}}$	$\frac{1}{\sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}}$
	Exponential pulse	$\sqrt{\frac{\tau}{2T}} (1 - e^{-2T/\tau})$ $\cong \sqrt{\frac{\tau}{2T}} V_m$	$\frac{\tau}{T} (1 - e^{-T/\tau})$ $\cong \frac{\tau}{T} V_m$	$\sqrt{\frac{T}{2\tau}}$	$\sqrt{\frac{2T}{\tau}}$

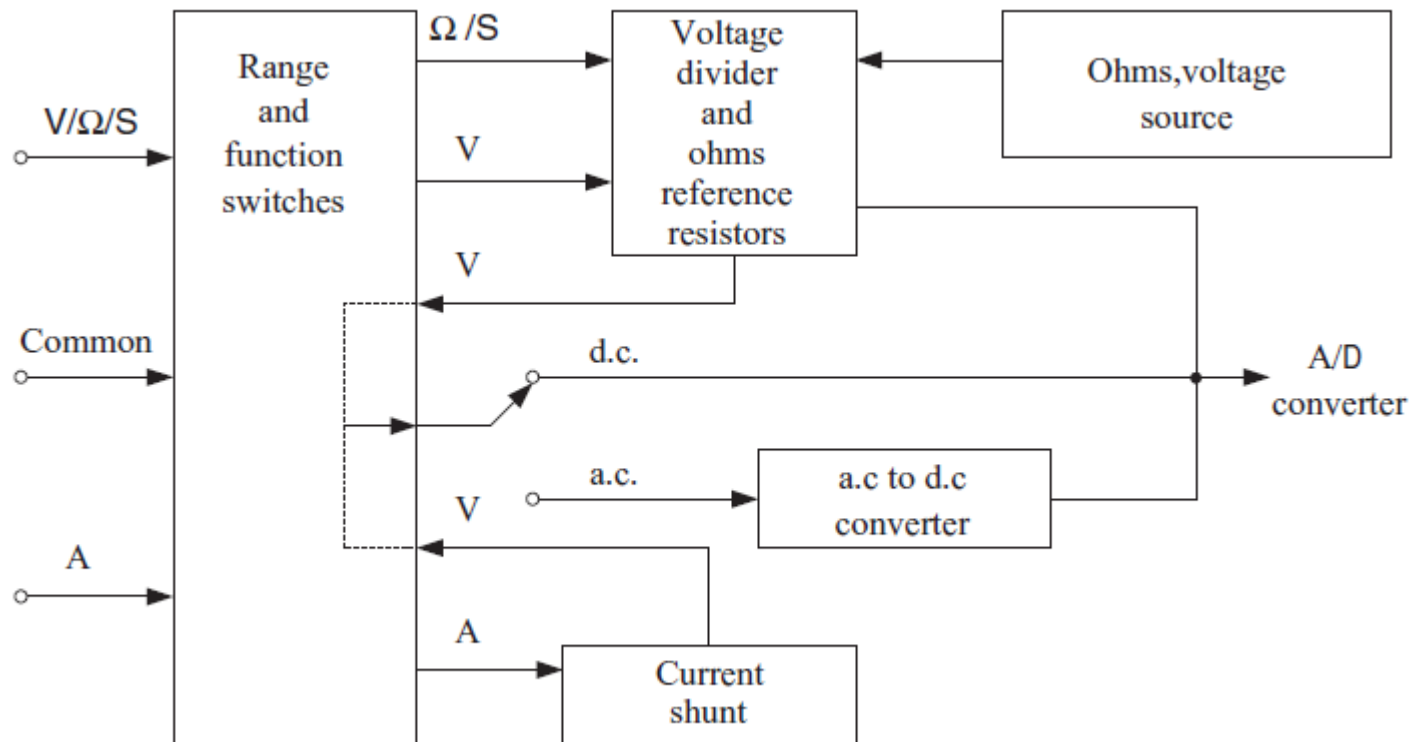


Waveform	Actual peak–peak	True r.m.s. reading	Average reading	Reading error (%)
Sine wave	2.000	0.707	0.707	0
Triangle wave	2.000	0.577	0.555	–3.8
Square wave	2.000	1.000	1.111	+11.1
Pulse (25% duty cycle)	2.000	0.433	0.416	–3.8
Pulse (12.5% duty cycle)	2.000	0.331	0.243	–26.5
Pulse (6.25% duty cycle)	2.000	0.242	0.130	–46.5

Спрощена блок-схема цифрового мультиметра



Функціональні блоки нормалізатора сигналу



Подільник напруги

