

Измервания в електрониката

1

Съдържание

13. Измерване на неелектрически величини

13. Измерване на неелектрически величини

13.1. Увод. Основни понятия

13.2. Класификация

13.3. Активни сензори

13.4. Пасивни сензори

13.1. Увод

□ Увод

- В. Сименс създава един от първите сензори 1860г.
- Между 1920 и 1940 - необходимост от управление на сложни процеси.
- Развитие на полупроводниковата техника през 50-те и 60-те години.
- 60-те години – проблем: липса на сензори, които да преобразуват неелектрически в-ни в електрически.
- 70-те години: първи решения.

13.1. Увод

□ Стандарти

- **ANSI MC6.1 1975**, Electrical Transducer Nomenclature and Terminology:
- **Transducer**: device which provides a usable **output** in response to a specified **measurand**.
- **Output**: electrical quantity .
- **Measurand**: a physical quantity, property or condition, which is measured.

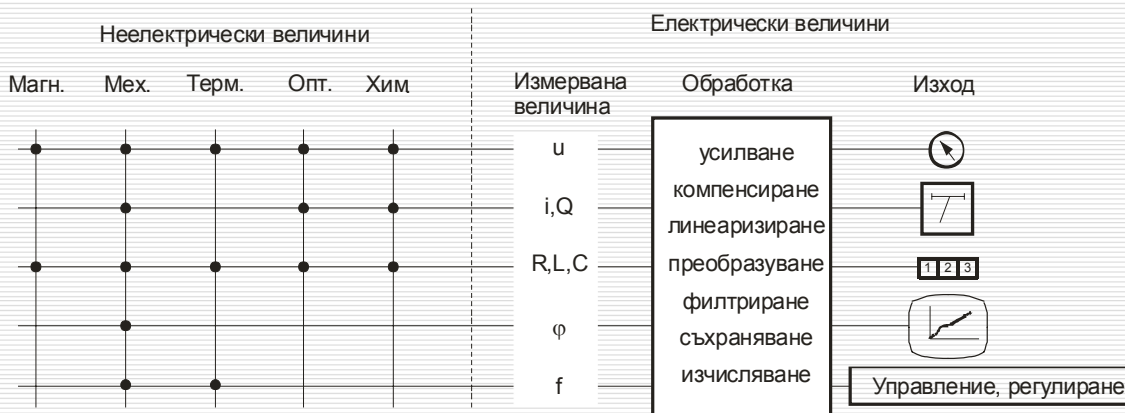
13.1. Увод

□ Основни понятия, дефиниции

- Според дефиницията на IEC (IEC draft 65-84) за технически сензори:
 - **„СЕНЗОРЪТ е първичният елемент в измервателната верига, който преобразува променливата входна величина в полезен измервателен сигнал.“**
- С помощта на сензори неелектрическите величини се преобразуват в електрически.
- Следва обработка и визуализация на сигналите.
- Понякога сигналите се използват за въздействия на околната среда чрез т.нар. **актуатори** (изпълнителни механизми).

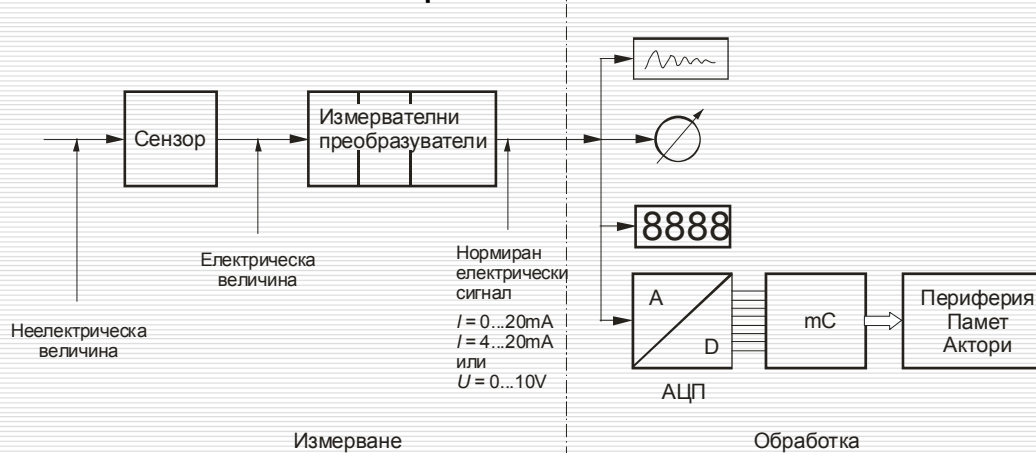
13.1. Увод

□ Основни понятия, дефиниции



13.1. Увод

□ Измервателна верига при измерване на неелектрически величини



13.1. Увод

- VDI/VDE 2600
- AMA



Базови, интегрални и интелигентни сензори

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

9

13.2. Класификация

- Основни критерии за класификация
 - Използвани физични и химични ефекти
 - Вид на измерваната величина
 - Приложения
 - Технология на материалите
 - .
 - .
 - Точност

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

10

13.2. Класификация

■ 6 основни класа сигнали

Величини	Примери
Механични	Дължина, обем, налягане, скорост, ускорение
Термични	Температура, топлинен поток, ентропия
Електрически	Напрежение, ток, заряд, съпротивление
Магнитни	Интензивност на полето, магнитен момент
Радиационни	Интензивност, фаза, дължина на вълната
Химични	Концентрация, рН

13.2. Класификация

■ Активни сензори и преобразувани неелектрически величини

Активни сензори	Неелектрически величини
Термоелемент	Температура
Фотоелемент	Фотометрични величини
Електрохимични елементи	рН
Пиезокристали, кварцови резонатори	Сила, налягане, ускорение

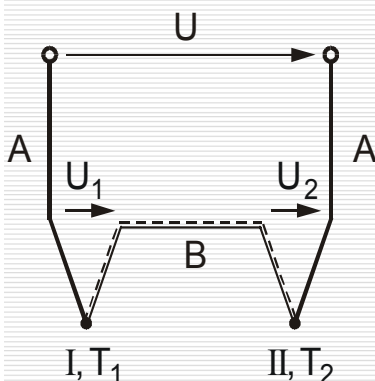
13.2. Класификация

□ Пасивни сензори

Пасивни сензори	Повлияна електрическа величина	Неелектрическа величина
Потенциометър	Омично съпротивление	Дължина, ъгъл
Тензорезистор	Омично съпротивление	Сила, налягане, дължина, ъгъл
Термосъпротивление	Омично съпротивление	Температура, поток
Фоторезистор, Фотоод, фототранзистор	Омично съпротивление	Фотометрични величини
Магниторезистор	Омично съпротивление	Дължина, ъгъл
Сензор на Хол	Напрежение	Дължина, ъгъл
Индуктивен сензор	Индуктивност	Дължина, ъгъл
Капацитивен сензор	Капацитет	Дължина, ъгъл
Радиоактивен сензор	Йонизация	Дължина, ъгъл

13.3. Активни сензори

□ Термоелемент



За точка I:

$$U_1 = m \cdot \frac{kT_1}{e_0} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) = \left(\frac{k}{e_0} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B}\right) T_1$$

$$U_1 = k_{AB} T_1$$

За точка II:

$$U_2 = k_{AB} T_2$$

$$U_1 + U_2 - U = 0$$

От наблюдението, че при равенство на температурите $T_1 = T_2$ не се генерира напрежение

$U = 0 \Rightarrow U_1 = -U_2$ и оттук:

$$k_{AB} T_1 = -k_{BA} T_1$$

$$k_{AB} = -k_{BA}$$

$$U = U_1 - U_2 = k_{AB}(T_1 - T_2)$$

Термоелемент

Материал X	Константан (Co)	Никел (Ni)	Платина (Pt)	Мед (Cu)	Желязо (Fe)	Никел-Хром (NiCr)
$k_{X_{Pt}, mV/(100K)}$	-3,47	-1,9	0,0	+0,7	+1,9	+2,2

Според DIN IEC 584, част 2:

Чувствителността на термодвойка, съставена от материали А и В е съответно:

$$k_{AB} = k_{APt} - k_{BPt}$$

Пример за термодвойка от желязо и константан:

$$k_{FeCo} = k_{FePt} - k_{CoPt} = 1,9 - (-3,47) = 5,37 \frac{mV}{100 K}$$

	Обхват:	Грешка:
Клас 1:	-40 °C до 1000 °C:	$\pm \text{Max}(1,5 \text{ } ^\circ\text{C}; 0,004 9)$
Клас 2:	-40 °C до 1200 °C:	$\pm \text{Max}(2,5 \text{ } ^\circ\text{C}; 0,0075 9)$
Клас 3:	-200 °C до 40 °C:	$\pm \text{Max}(2,5 \text{ } ^\circ\text{C}; 0,015 9)$

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

15

Термоелемент

Наличие и на квадратна зависимост от температурната разлика, която трябва да се вземе предвид при работа в по-широк температурен обхват:

$$U = a_{AB} (T_1 - T_2) + b_{AB} (T_1 - T_2)^2$$

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

16

Термоелемент

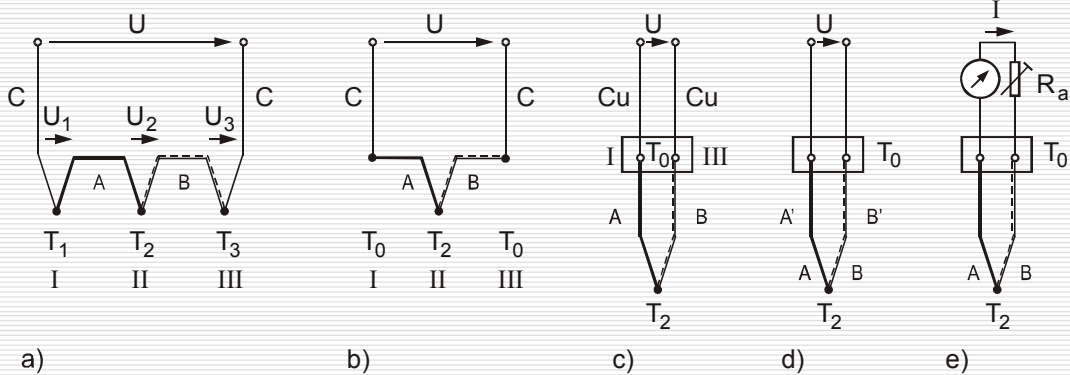
Реализация на термоелементи с 3 материала А, В и С

a, b) Принцип

c) Техническа реализация на термоелемент, T_0 – температура на студения край

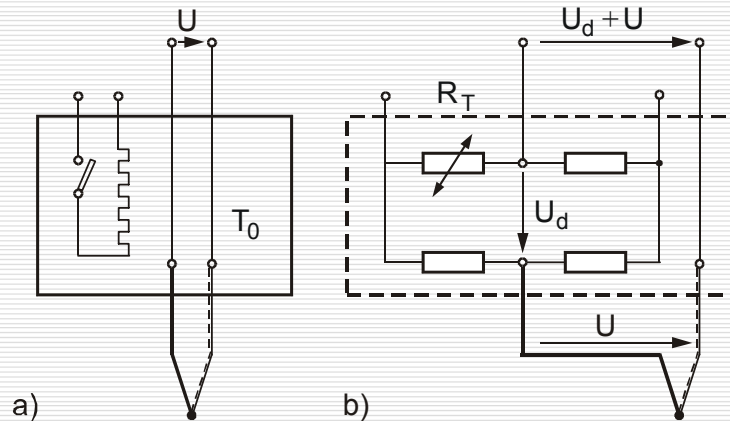
d) Приложение на удължаващи проводници А' и В'

e) Допълнителен резистор R_a за настройка на съпротивлението на 20Ω и измерване на тока I
Според DIN IEC 584, част 2:



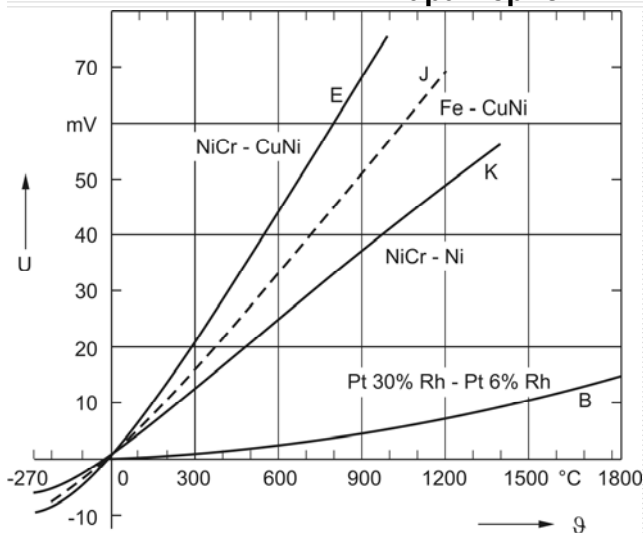
Термоелемент

Поддържане на постоянна температура на студения край чрез термостат (a) или чрез коригираща схема (b)



Термоелемент

Характеристики на термоелементи



Полином за термодвойка NiCr-Ni (тип K)

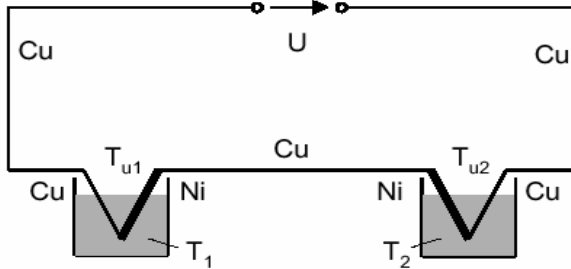
$$U = \sum_{i=0}^8 b_i \vartheta^i + 125 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\vartheta - 127}{65} \right)^2 \right] \mu V$$

Термоелемент

Температура $T_1, ^\circ\text{C}$	Напрежение U Fe-CuNi, mV	Напрежение U NiCr-Ni, mV
-200	-8,15	
-100	-4,75	
0	0	0
100	5,37	4,10
200	10,95	8,13
300	16,56	12,21
400	22,16	16,40
500	27,85	20,65
600	33,67	24,91
700	39,72	29,14
800		33,30
900		37,36
1000		41,31

Термоелемент - пример

- За измерването на температурната разлика T_d на две течности се използват 2 термоелемента, свързани както е показано на фигурата. T_1 и T_2 са температурите на течностите, T_{u1} и T_{u2} са температурите на съответните околни среди.

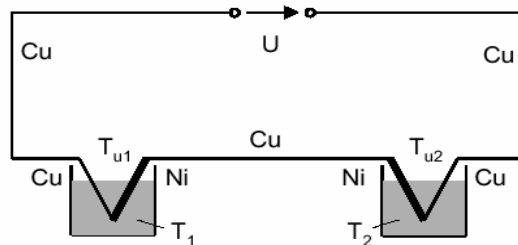


Термоелемент - пример

- a) Изведете зависимостта
 $U = f(T_d, T_{u1}, T_{u2}, k_{CuNi})$, където $T_d = T_1 - T_2$
- b) Изведете зависимостта за чувствителността E на напрежението U по отношение на температурната разлика T_d .
- c) Каква температурната разлика T_d съответства за стойност на $U = 130 \mu V$?
- $(T_{u1} = T_{u2})$;
 - $(k_{CuPt} = 0,7 \text{ mV}/100\text{K}; k_{NiPt} = -1,9 \text{ mV}/100\text{K})$

Термоелемент - пример

$$\begin{aligned}
 \text{a) } U &= k_{\text{CuNi}} \cdot T_1 + k_{\text{NiCu}} \cdot T_{U1} + k_{\text{CuNi}} \cdot T_{U2} + k_{\text{NiCu}} \cdot T_2 \\
 &= k_{\text{CuNi}} \cdot (T_1 - T_2 - T_{u1} + T_{u2}) = \\
 &= k_{\text{CuNi}} \cdot (T_d - T_{u1} + T_{u2})
 \end{aligned}$$



Термоелемент - пример

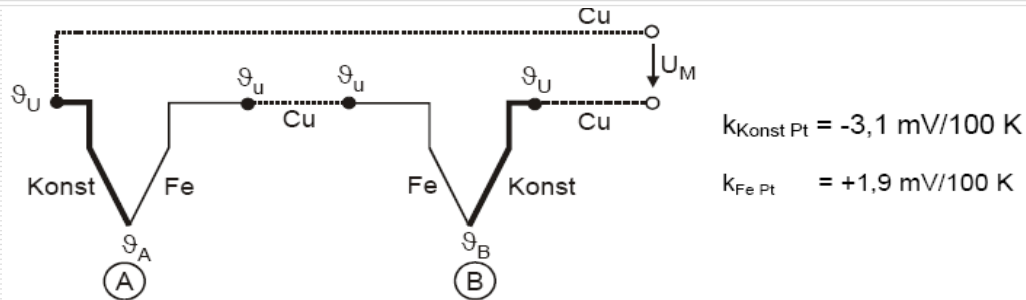
$$\text{b) } E = \frac{dU}{dT_d} = k_{\text{CuNi}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c) } T_{U1} &= T_{U2} \\
 U &= k_{\text{CuNi}} \cdot T_d = k \cdot (k_{\text{CuPt}} - k_{\text{NiPt}}) \cdot T_d = \\
 T_d &= \frac{U}{(k_{\text{CuPt}} - k_{\text{NiPt}})} = \frac{130 \mu\text{V}}{2,6 \frac{\text{mV}}{100\text{K}}} = 5\text{K}
 \end{aligned}$$

Задачи

□ Задача 1.

За измерването на температурната разлика $\vartheta_A - \vartheta_B$ в две точки А и В се използват 2 еднакви термоелемента Fe-Konst, свързани както е показано на фигурата. ϑ_U температурата на околната среда. Температурите ϑ_A , ϑ_B и ϑ_U се измерват в градуси Целзий.



Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

25

Термоелемент – задача

a) Изчислете коефициента на чувствителност

$$k_{Fe-Konst}$$

b) Изведете зависимостта

$$U_M = f(\vartheta_i, k_{xy})$$

c) Каква температурната разлика $\vartheta_A - \vartheta_B$ съответства за стойност на $U_M = 220 \mu\text{V}$?

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

26

Термоелемент – задача

а) Изчислете коефициента на чувствителност

$$k_{\text{Fe-Konst}} = \frac{1,9 - (-3,1) \text{ mV}}{100 \text{ K}} = \frac{5,0 \text{ mV}}{100 \text{ K}}$$

Термоелемент – задача

б) Изведете зависимостта

$$U_M = f(\vartheta_i, k_{xy})$$

$$k_{\text{CuKonst}} + \vartheta_U k_{\text{FeKonst}} \vartheta_A + k_{\text{FeCu}} \vartheta_U + k_{\text{CuFe}} \vartheta_U + k_{\text{FeKonst}} \vartheta_B + k_{\text{KonstCu}} \vartheta_U - U_M = 0$$

$$k_{xy} \vartheta_i = -k_{yx} \vartheta_i$$

$$k_{\text{KonstFe}} \vartheta_A + k_{\text{FeKonst}} \vartheta_B = U_M$$

$$U_M = k_{\text{KonstFe}} (\vartheta_A - \vartheta_B)$$

Термоелемент – задача

- с) Каква температурната разлика $\vartheta_A - \vartheta_B$ съответства за стойност на $U_M = 220 \mu V$?

$$\vartheta_A - \vartheta_B = \frac{0,220 \text{ mV}}{5,0 \text{ mV}/100 \text{ K}} = 0,044 \cdot 100 \text{ K} = 4,4 \text{ K} = 4,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Полупроводникови температурни сензори

- Температурна зависимост на рп-прехода

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{m k T / e}} \quad \text{след логаритмуване} \quad U_D = m \cdot \frac{k T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right)$$

- Където: $1 \leq m \leq 2$ – коефициент, I_D – прав ток, I_S – обратен ток.
- Напрежението в права посока е пропорционално на абсолютната температура

Полупроводникови температурни сензори

- Проблем: **температурна зависимост на I_S** .
- Решение: използване на два еднотипни рп-прехода (обикновено преход база-емитер на 2 интегрални транзистора) с различни токове в права посока - I_{D1} и I_{D2} , при което се получава потенциална разлика $U_{D2} - U_{D1}$.
- Потенциалната разлика е независима от обратния ток и нараства линейно с абсолютната температура:

$$U_{D2} - U_{D1} = m \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_S}\right) - m \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_S}\right) = m \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{D2}}{I_{D1}}\right).$$

Полупроводникови температурни сензори

- **Характеристики:**
 - добра линейност;
 - Обхват -50 °C до 150 °C;
 - Интегрален сензор + усилвател;
 - Чувствителности: 1-20 mV/K
респ. 1 μA/K.
- **Примери:**
 - Изход напрежение: LM 335, AD 22100, AD22103;
 - Изход ток: AD 590, AD 592.

Измерване на рН

□ Потенциална разлика:

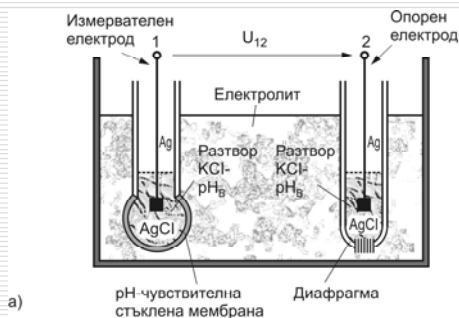
$$\Delta U = \Phi_M - \Phi_L ; \quad \frac{n_M}{n_L} = \exp\left(\frac{-e \cdot \Delta U}{kT}\right)$$

$$\Delta U = -\frac{kT}{e} \ln \frac{n_M}{n_L} \quad \text{Уравнение на Нернст за положителни йони}$$

$$-\frac{kT}{e} = \text{const, за } T = \text{const.}$$

⇒ $\Delta U = f(\text{Разлика на концентрациите})$.

Измерване на рН



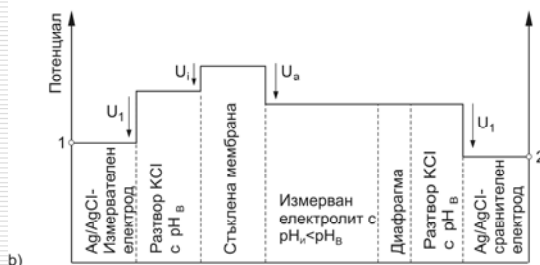
$$U_{12} = -U_1 - U_i + U_a + U_1 = U_a - U_i$$

С помощта на уравнението на Нернст:

$$U_{12} = \frac{kT}{e} \ln \frac{(a_{H^+})_I}{(a_{H^+})_B}$$

$$pH = -\lg a_{H^+} (= -\lg n_{H_3O^+})$$

$$U_{12} = \frac{kT}{e} (\ln(a_{H^+})_I - (a_{H^+})_B)$$



Измерване на рН

$$\square \text{ За } \frac{k}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{As}} = 8,6173 \cdot 10^{-5} \frac{\text{V}}{\text{K}}$$

$$\frac{U_{12}}{\text{V}} = 1,9842 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{T}}{\text{K}} \cdot (\text{pH}_{\text{В}} - \text{pH}_{\text{И}})$$

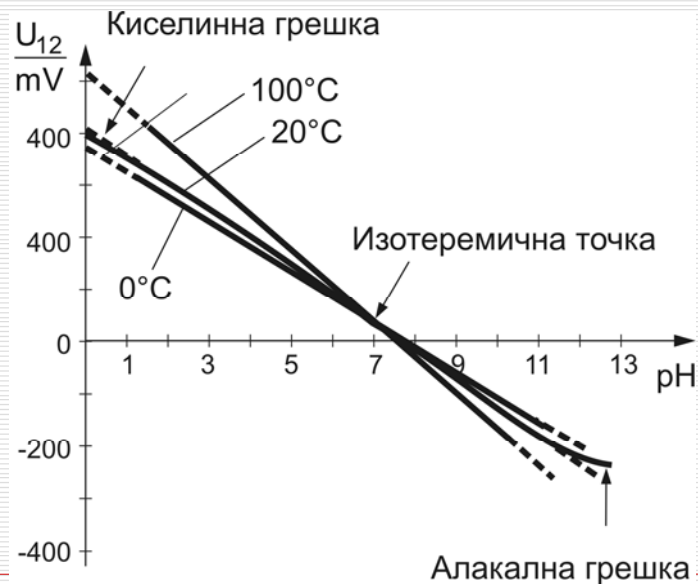
$$\frac{U_{12}}{\text{mV}} \approx 0,2 \cdot (\text{pH}_{\text{В}} - \text{pH}_{\text{И}}) \cdot \frac{\text{T}}{\text{K}}$$

За T = 298K се получава за S:

$$S = \frac{\Delta U_{12}}{\Delta \text{pH}} \approx -0,1984 \cdot 298 \frac{\text{mV}}{\text{pH}} = -59,2 \frac{\text{mV}}{\text{pH}}$$

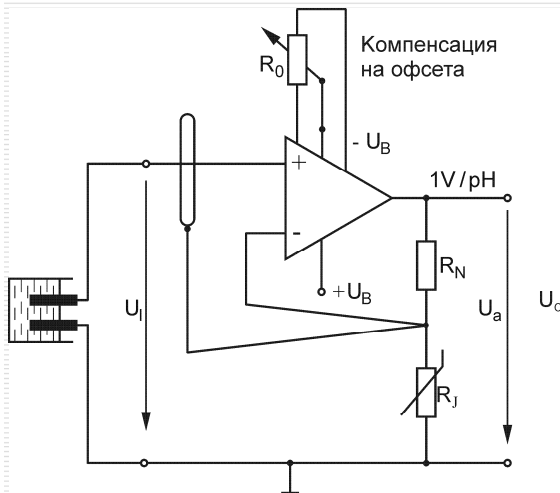
Измерване на рН

Характеристика на рН електрод:



Измервателни схеми

Неинвертираща схема с високо входно съпротивление:

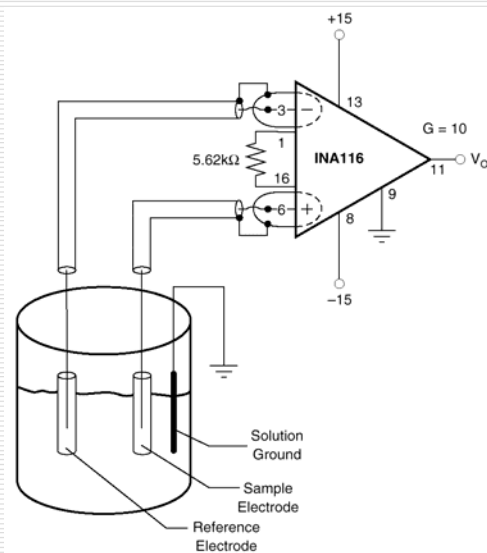


□ При оразмеряване на схемата с $R_N = 19 \text{ k}\Omega$ и $R_J = 1 \text{ k}\Omega$ се получава коефициент на усилване $K_U = 20$ и чувствителност около 1 V/pH .

□ Чрез използването за R_J на температурнозависимо съпротивление, избрано според температурния коефициент на сензорния сигнал ($+3500 \text{ ppm/K}$ за стъклен електрод) може да се постигне много добра компенсация.

Измервателни схеми

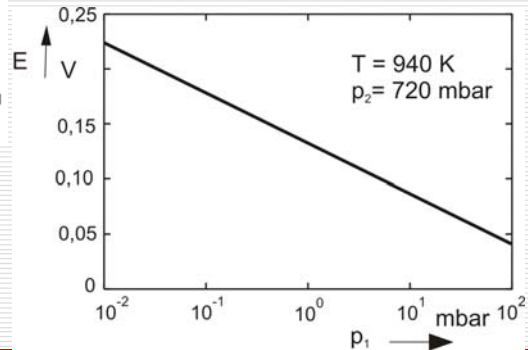
Схема с инструментален усилвател:



Твърдоелектролитни газови сензори



$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_2, M}}{p_{O_2, R}}$$



Принципната структура на кислороден сензор на основата на дотиран ZrO_2

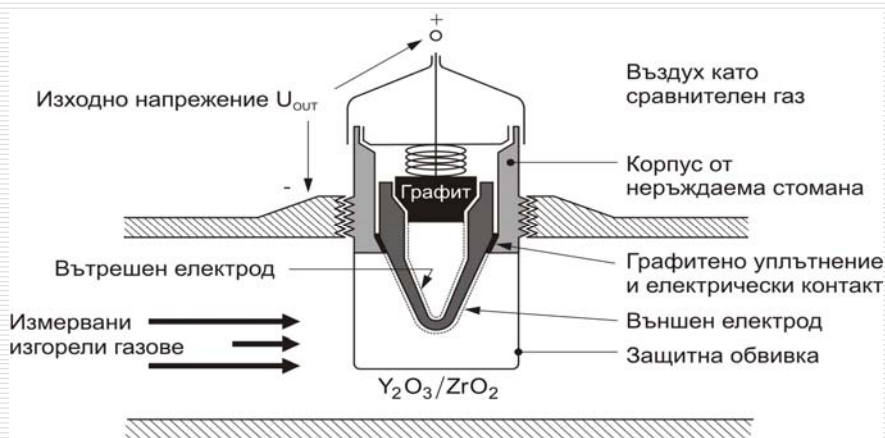
Твърдоелектролитни газови сензори

- ❑ При затворен токов кръг през металния проводник протичат електрони от анода към катода.
- ❑ През структурата преминават кислородни йони от катода към анода.
- ❑ При отворен токов кръг се генерира напрежението U_{21} :



$$U_{21} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Ламбда-сонда

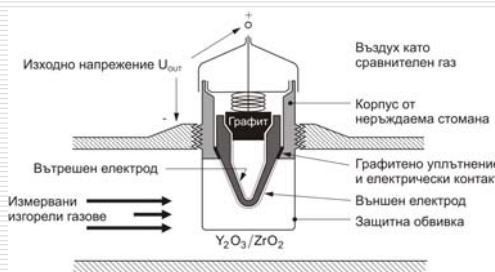


Ламбда-сонда

$\lambda = 1$ – пълно изгаряне

$\lambda < 1$ – недостатъчно кислород

$\lambda > 1$ – излишък на кислород



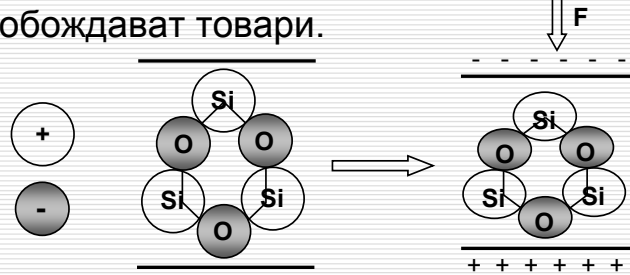
$$\lambda = 0,9 \quad p_1^* = 1,9 \cdot 10^{-27} \quad U = 998 \text{ mV}$$

$$\lambda = 1,1 \quad p_1^* = 1,8 \cdot 10^{-2} \quad U = 41 \text{ mV}$$

Пиезоелектрически сензори и актуатори

□ Пиезоелектрически ефект

- Материали, в които положителните и отрицателните товари са разположени **несиметрично**, налице е **поляризация**.
- При деформация се променят диполните моменти, променя се поляризацията и на повърхността се освобождават товари.



Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

43

Пиезоелектрически сензори и актуатори

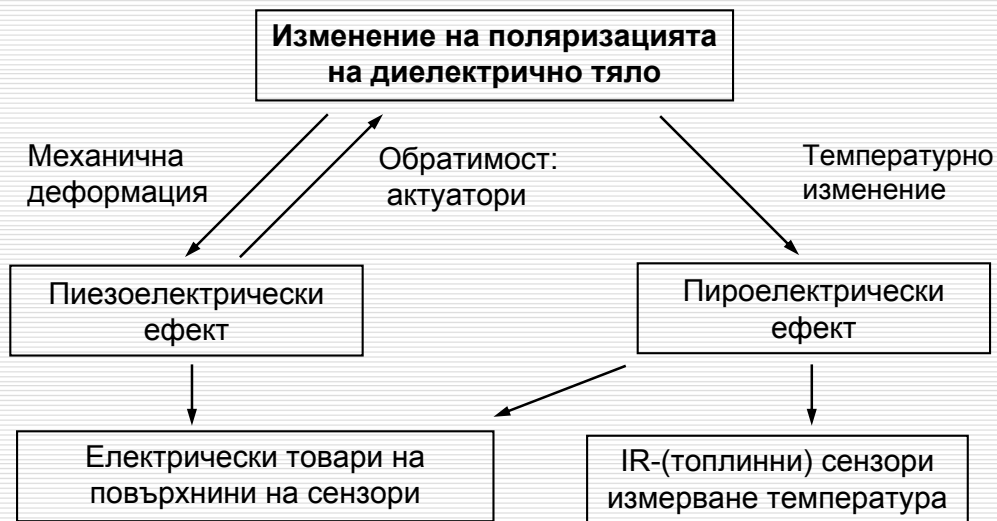
□ Пироелектрически ефект

- Поляризацията на диелектричните тела се променя не само при механично въздействие, но и при температурни изменения.
- Освободените на повърхността товари могат да служат за мярка за температурното изменение.

Технически университет София
Факултет по електронна техника и технологии

44

Пиезоелектрически сензори и актуатори



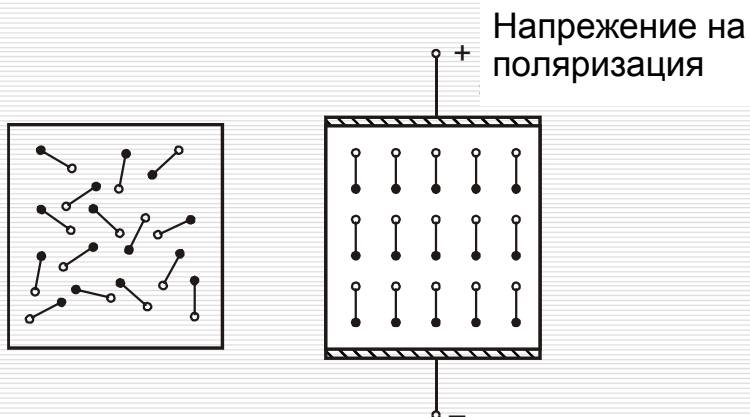
Пиезоелектрически сензори и актуатори

□ Материали:

- Монокристали: напр. кварц, триглицинсулфат - TGS, LiTaO_3 ;
- Поликристални керамики: бариев титанат - BaTiO_3 , оловен титанат - BaTiO_3 , PbZrO_3 , PZT - $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$;
- Органични полимери: PVDV.

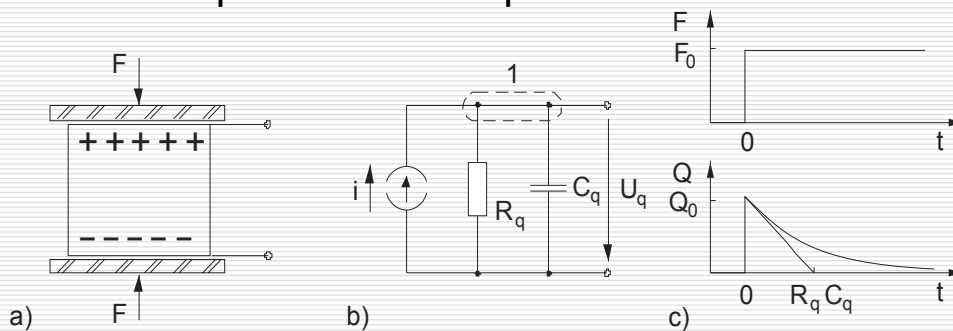
Пиезоелектрически сензори и актуатори

- Поляризация на пиезоелектрическо тяло – диполите се подреждат под въздействие на електрическо поле



Пиезоелектрически сензори и актуатори

- (a) - Структура, (b) - еквивалентна схема и
- (c) – реакция при стъпаловидно въздействие на пиезоелектрически сензор



Пиезоелектрически сензори и актуатори

$$Q = kF$$

$$U_q = \frac{Q}{C_q}$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{U_q}{R_q} - C_q \frac{dU_q}{dt} = 0$$

$$\frac{U_q}{R_q} + C_q \frac{dU_q}{dt} = \frac{dQ}{dt}$$

$$U_{q,h} = Ke^{-t/R_q C_q}$$

$$U_q = \frac{Q}{C_q} e^{-t/R_q C_q}$$

Пиезоелектрически сензори и актуатори

Измерване на ускорение

$$a = \frac{F}{m}$$

Измерване на налягане

$$p = \frac{F}{A}$$