

Senzory II.

Ing. Pavol Dolinský
KEMT FEĽTU Košice
2015

Teplota

- Teplota je termodynamická stavová veličina a určuje ju stredná kinetická energia neusporiadaného pohybu molekúl.
- Základnou jednotkou je Kelvin [K], definovaný ako 273,16-tá časť termodynamickej teploty trojného bodu vody /0,01°C/ (od absolútne nulovej teploty 0K).
- Často používanou jednotkou je stupeň Celzia [°C]
- $t[°C] = T[K] - 273,15$

Elektrické senzory pre meranie teploty

- Dotykové meranie teploty
 - Termoelektrické
 - Odporové
 - Kovové
 - Polovodičové
 - Polovodičové s PN prechodom a integrované snímače
- Bezdotykové meranie
 - Pyrometre
 - Termovízia

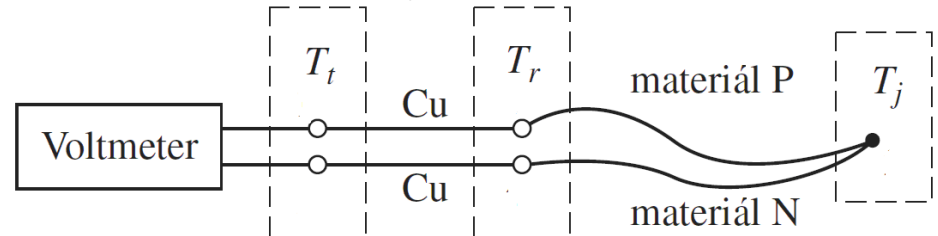
Termočlánky I.

- Využíva sa Seebeckov termoelektrický jav. Vo vodiči, ktorý má konce na rozdielnych teplotách vznikne napätie:

$$U_{AB} = \int_{T_A}^{T_B} \sigma(T) dT$$

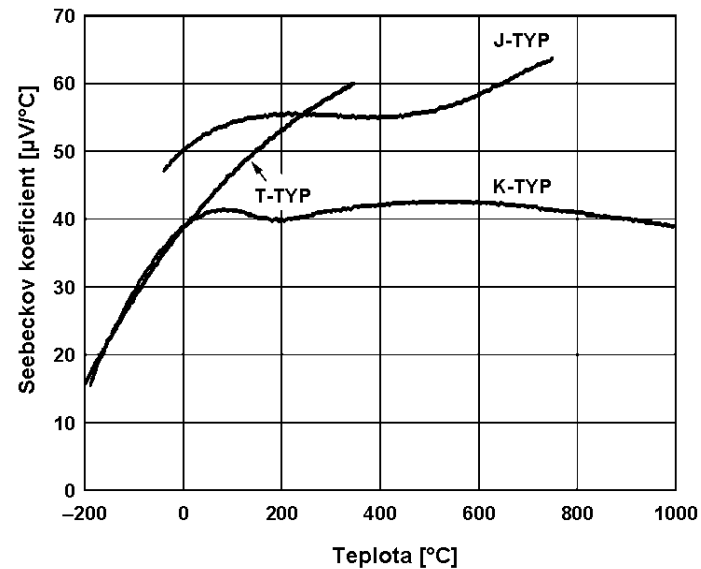
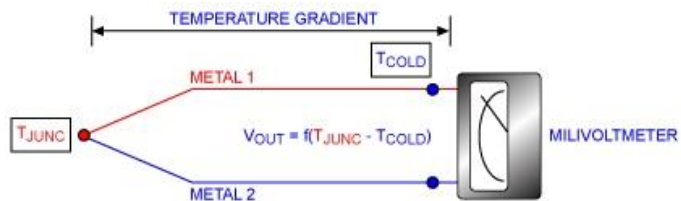
- σ je Seebeckov koeficient, ktorý je vlastnosťou materiálu vodiča a je závislý na teplote, ale nezávisí od dĺžky, tvaru ani prierezu vodiča.
- Termočlánok tvoria dva vodiče z rôzneho materiálu (s rôznym σ) spojené na jednom konci (merací spoj) a na opačnom konci (porovnávací spoj) meriame vzniknuté napätie:

$$U = \int_{T_r}^{T_j} \sigma_P(T) dT - \int_{T_r}^{T_j} \sigma_N(T) dT = \int_{T_r}^{T_j} [\sigma_P(T) - \sigma_N(T)] dT = \int_{T_r}^{T_j} \sigma_{PN}(T) dT$$



Termočlánky II.

- σ_{PN} je relatívny Seebeckov koeficient, udáva sa v jednotkách $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, je závislý od teploty \rightarrow vzniká nelinearita
- Napätie termočlánku nevzniká v meracom spoji, ale v miestach, kde sa mení teplota po dĺžke celých vodičov termočlánku (teplotný gradient)
- Generované napätie závisí od rozdielu teplôt porovnávacieho spoja a meracieho spoja. Porovnávací spoj by preto musel mať 0°C , aby napätie zodpovedalo meranej teplote! \rightarrow kompenzácia porovnávacieho spoja



Typ termočlánku	Materiál P	Materiál N	Typický rozsah teplôt [$^\circ\text{C}$]	Seebeckov koef. pri 25°C [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
E	Chromel	Konštantán	-200 až $+900$	61
J	Železo	Konštantán	0 až $+760$	52
T	Meď	Konštantán	-200 až $+371$	41
K	Chromel	Alumel	-200 až $+1250$	41

Termočlánky III.

Kompenzácia porovnávacieho spoja:

- Softvérová (meriame teplotu porovnávacieho spoja iným senzorom):

- Vypočítame kompenzované napätie U_K :

$$U = \sum_{i=0}^n b_i t_j^i$$

$$U_K = U + U_r = U + \sum_{i=0}^n b_i t_r^i$$

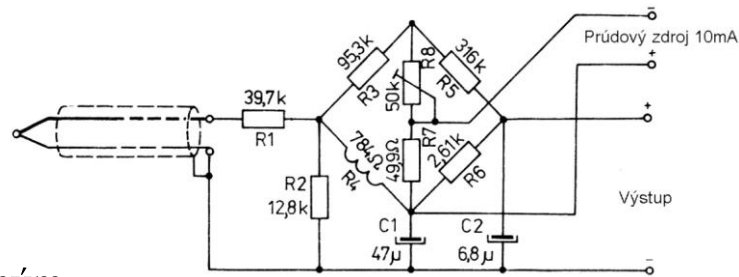
- Vypočítame teplotu meranú termočlánkom:

$$t_j = \sum_{i=0}^n c_i U_K^i$$

Koeficienty b_i a c_i sa udávajú v tabuľkách

- Hardvérová:

- Kompenzačná krabica
- Izotermický blok
- Kompenzácia v ľadovom kúpeli pri 0°C

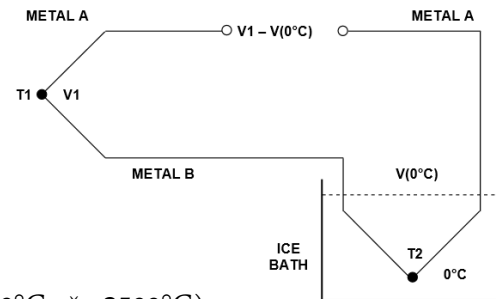


- Výhody termočlánkov:

- Veľký rozsah meraných teplôt (-200°C až $+2500^\circ\text{C}$)
- Malá tepelná kapacita \rightarrow rýchla odozva, odolnosť voči otrasom
- Jednoduchá konštrukcia, vhodný do nebezpečných prostredí

Nevýhody:

- Malá úroveň výstupného napätia a náchylnosť na rušenie
- Zložitý prepočet napätia na meranú teplotu
- Náchylnosť na koróziu



Kovové odporové senzory teploty (RTD) I.

- Najstabilnejšie presné senzory teploty pre rozsah -190°C až $+800^{\circ}\text{C}$ (vysoká presnosť a opakovateľnosť merania)
- Elektrický odpor R všetkých kovových vodičov s rastúcou teplotou t rastie. Táto závislosť je vo všeobecnosti nelineárna a v okolí referenčnej teploty t_0 sa aproximuje pomocou polynómu:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha\Delta t + \beta\Delta t^2 + \gamma\Delta t^3 + \dots) \quad \alpha, \beta, \gamma \dots \text{ sú teplotné koeficienty závislé od materiálu}$$

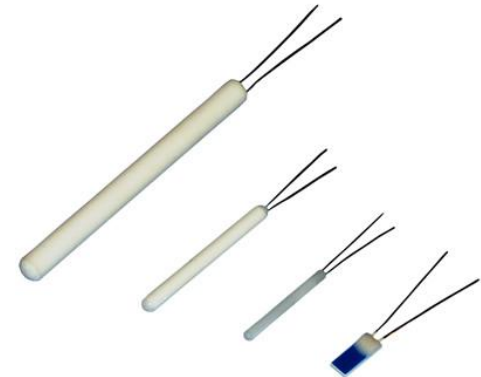
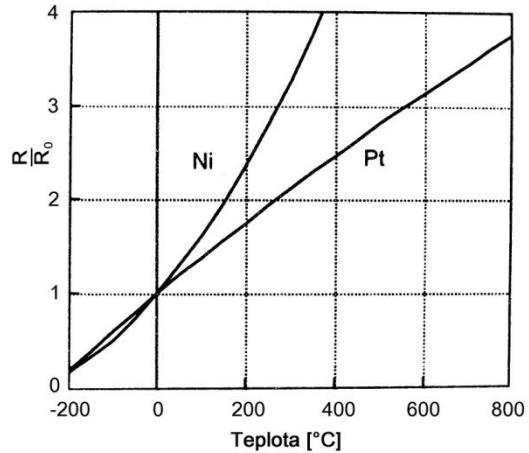
- Platina (senzory PT100 a PT1000, odpor majú 100Ω resp. 1000Ω pri teplote 0°C), má vysoký bod topenia, dlhodobá stálosť odporu, neoxiduje na vzduchu pri vysokej teplote, má pomerne lineárnu charakteristiku v rozsahu teplôt od -190°C až $+400^{\circ}\text{C}$. Pre PT100 platí:

$$R(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

$$A = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \quad B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; \quad C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}; \quad R_0 = 100\Omega$$

- Z toho vyplýva, že odpor PT100 sa zväčší iba o $0,39\Omega/^{\circ}\text{C}$ -> potreba presných meracích obvodov!

Kovové odporové senzory teploty (RTD) II.

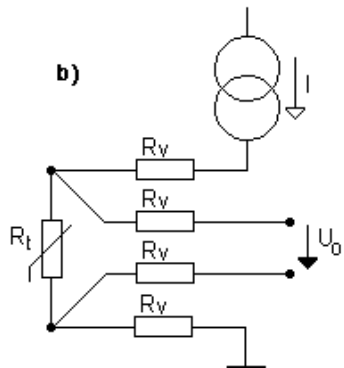
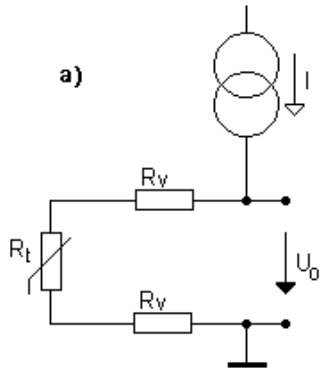


Materiál	Teplotný koeficient α [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	Rozsah pracovných teplôt senzora [$^{\circ}\text{C}$]
Platina	0,00385	-190 až +800
Nikel	0,0067	-100 až +300
Volfrám	0,0048	-100 až +400
Meď	0,0043	-100 až +250

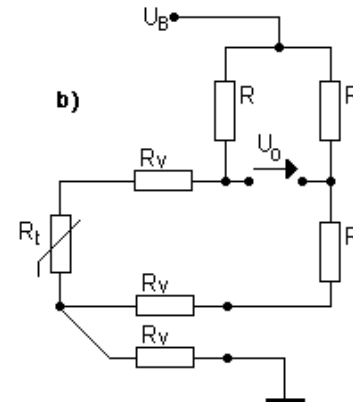
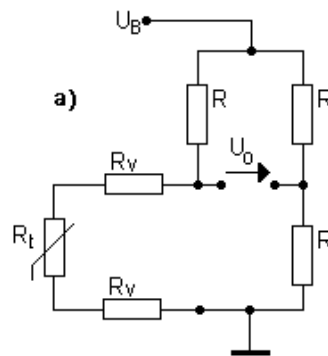


Meracie zapojenia pre RTD

- Dvojvodičové (2W) a štvorvodičové zapojenie (4W)
 - Potreba veľkého rozlíšenia meracieho prístroja



- Zapojenia v mostíku, dvojvodičové a trojvodičové (3W)
 - Treba uvažovať odpor prírodných vodičov (tiež závislý na teplote)



Príklad - uvažujme 4W zapojenie:

$I=1\text{mA}$; R_t je typu PT100, kde odpor pri 1°C je $100,39\Omega$ potom výstupné napätie:

$$U_o = R_t \cdot I = 100,39 \cdot 0,001 = 0,10039\text{V}$$

Termistory NTC a PTC

- Princíp podobný ako RTD, používa sa ale polovodič. Odpor s rastúcou teplotou klesá (NTC negasty) alebo rastie (PTC pozistory)



- Výhoda: teplotný koeficient je asi 5 až 50 krát väčší ako u RTD -> vyššia citlivosť, odpor rádovo Ω až $k\Omega$
Nevýhoda: nižší rozsah pracovných teplôt (niekedy len 0°C až 100°C), malá časová stálosť, veľká nelinearita

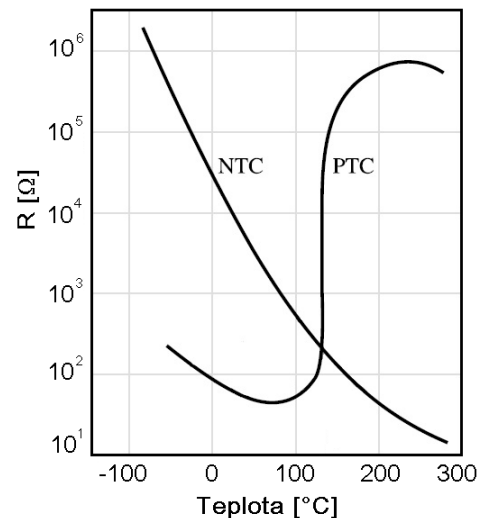
- Pre meranie teploty sa používa obyčajne NTC:

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} ; R_0 \text{ je odpor pri teplote } 25^\circ\text{C} \text{ a } \beta \text{ je materiálová konštanta}$$

- Pre presný výpočet teploty z odporu sa používa Steinhart-Hartova rovnica:

$$T = [A + B \cdot \ln R + C (\ln R)^3]^{-1} \quad \text{konštanty A, B a C udáva výrobca}$$

- PTC termistor sa často používa ako teplotná poistka, vratná poistka (PPTC) alebo vykurovacie teleso s vlastnou samočinnou reguláciou teploty.



Výkonová strata na odporových senzoch teploty

- Ak budíme odporový senzor teploty prúdom, vzniká na ňom výkonová strata -> senzor sa zahrieva -> skreslený údaj o meranej teplote
- Výrobca udáva v katalógu hodnotu zaťažovacej konštanty D -> výkon potrebný na ohriatie senzora o 1°C . Najvyšší dovolený budiaci prúd je potom:

$$I_d = \sqrt{\frac{\Delta T \cdot D}{R}}$$

R je maximálny odpor senzora teploty v požadovanom rozsahu meraných teplôt a ΔT je prípustná chyba ohriatím

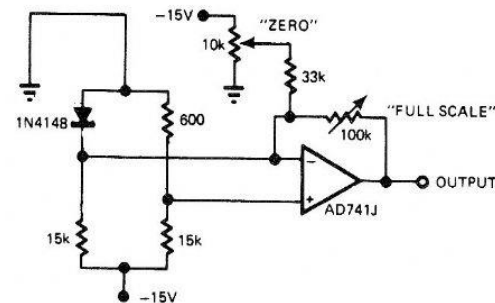
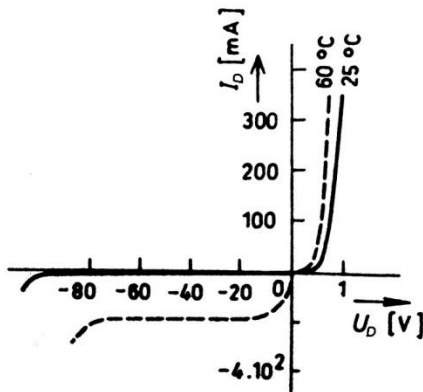
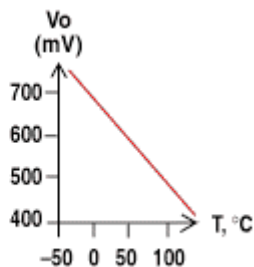
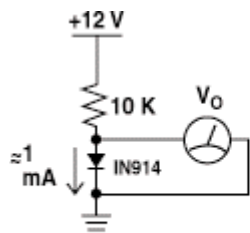
PN prechod

- Využíva sa teplotná závislosť napätia na PN prechode diódy v priepustnom smere

$$U_D = nU_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right)$$

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

- U_D s rastúcou teplotou klesá takmer lineárne
- možnosť použiť ako senzor teploty s pomerne veľkým teplotným koeficientom asi $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ (pri konštantnom prúde I_D)

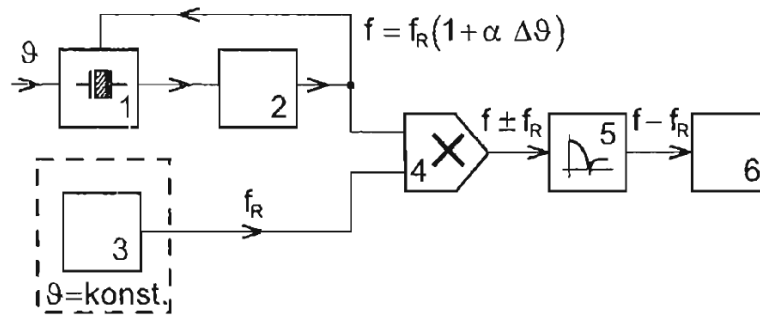


Porovnanie

THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTOR	SEMICONDUCTOR
Widest Range: -184°C to +2300°C	Range: -200°C to +850°C	Range: 0°C to +100°C	Range: -55°C to +150°C
High Accuracy and Repeatability	Fair Linearity	Poor Linearity	Linearity: 1°C Accuracy: 1°C
Needs Cold Junction Compensation	Requires Excitation	Requires Excitation	Requires Excitation
Low-Voltage Output	Low Cost	High Sensitivity	10mV/K, 20mV/K, or 1µA/K Typical Output

Kryštálový teplomer

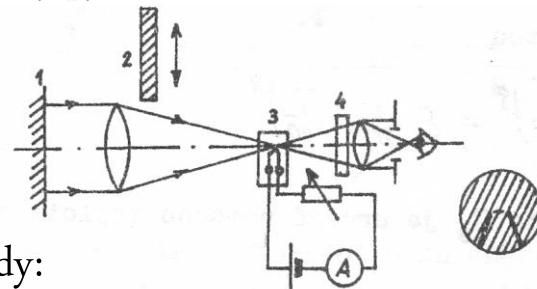
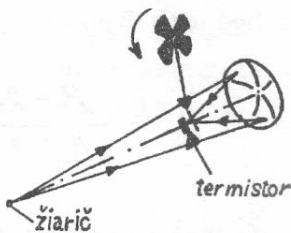
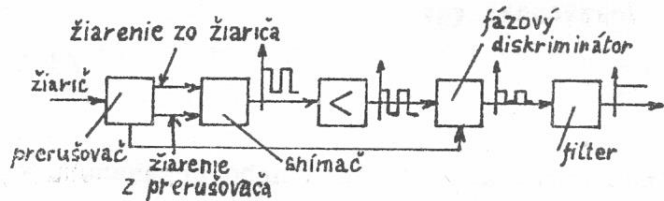
- Rezonančná frekvencia kremenného výbrusu je závislá od teploty
- Zisťuje sa rozdiel v kmitočte dvoch kryštálových oscilátorov, jeden je referenčný (v termostate), kryštálom druhého meriame teplotu
- Rozsah teplôt je asi -80°C až $+250^{\circ}\text{C}$ a dá sa dosiahnuť rozlíšenie až 10^{-4}°C



Obr. 3.34 Blokové schéma kryštálového teplomeru
(1 - kremenný senzor, 2 - oscilátor řízený kryštálem, 3 - oscilátor řízený kryštálem v termostatu,
4 - směšovač, 5 - nízkofrekvenční filtr, 6 - čítač s displejem)

Bezdotykové meranie teploty

- Vyhodnocuje sa tepelné žiarenie (infračervené od 0,8 μ m do 30 μ m) meraného predmetu v rozsahu teplôt -40°C až +10000°C
- Radičné pyrometre: vyhodnocuje sa v celom spektre vlnových dĺžok. Žiarenie sa zaostrí sústavou šošoviek na snímač.
- Spektrálne pyrometre: Vyhodnocuje sa teplota z maxima vyžarovacej charakteristiky (závislé od teploty žiariča)
- Jasový pyrometer:



- Výhody:
 - Zanedbateľný vplyv meracieho prístroja na meraný objekt
 - Meranie na otáčajúcich sa telesách
 - Meranie rýchlych zmien

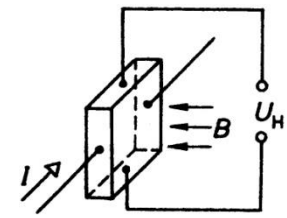
Meranie frekvencie otáčania

- Otáčka je uhlová zmena o 360° , ktorú vykoná teleso okolo osi otáčania. Frekvencia otáčania je celkový počet otáčok, ktoré vykoná teleso za časový interval:

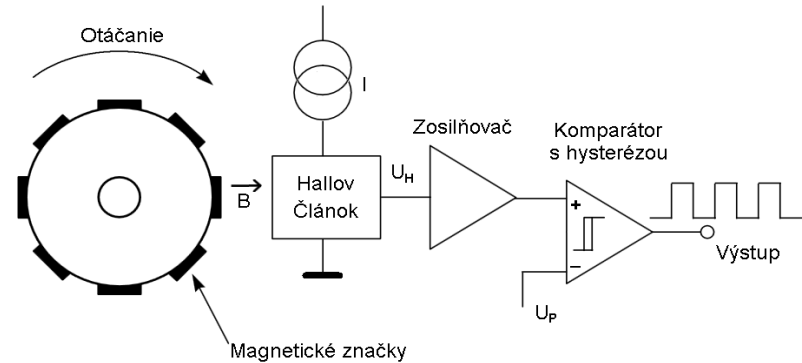
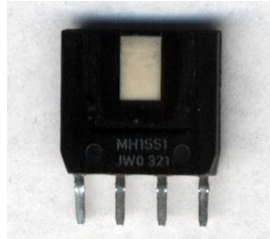
$$n = \frac{N}{t}$$

- Jednotkou frekvencie otáčania je s^{-1} , často sa v praxi používajú jednotky: otáčky za sekundu (ot/s) alebo otáčky za minútu (ot/min).
- Prístroje, na meranie frekvencie otáčania sa nazývajú otáčkomery.

Otáčkomer s Hallovým senzormom



- Využíva Hallov jav: ak na polovodič v tvare hranolu, ktorým tečie prúd I pôsobí magnetické pole B kolmo na tento prúd, vzniká na jeho protiľahlých hranách Hallovo napätie U_H
- Pre meranie frekvencie otáčania snímame magnetické značky na hriadeľi Hallovým senzormom s impulzným výstupom



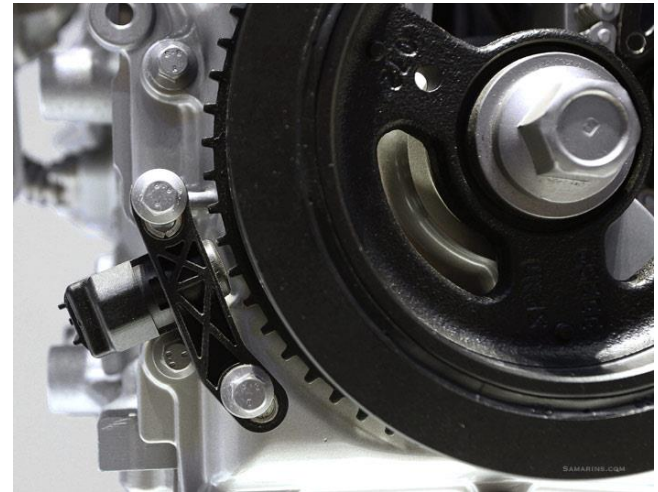
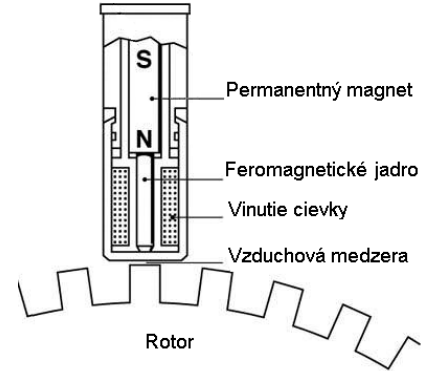
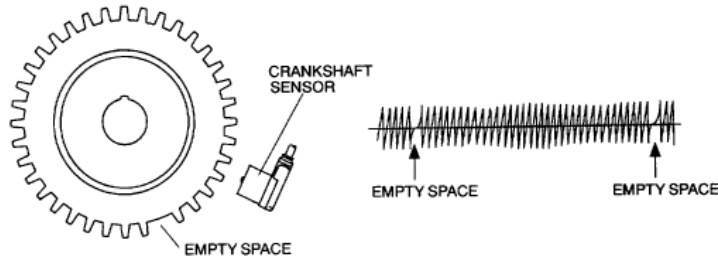
- Meranie frekvencie otáčania pomocou impulzov odvodených z otáčok hriadeľa patrí medzi najpresnejšie metódy.

Otáčkomer s indukčným senzorom

- Používa sa cievka navinutá na permanentný magnet
- Ak sa v jej blízkosti pohybuje feromagnetická značka indukuje sa v nej napätie

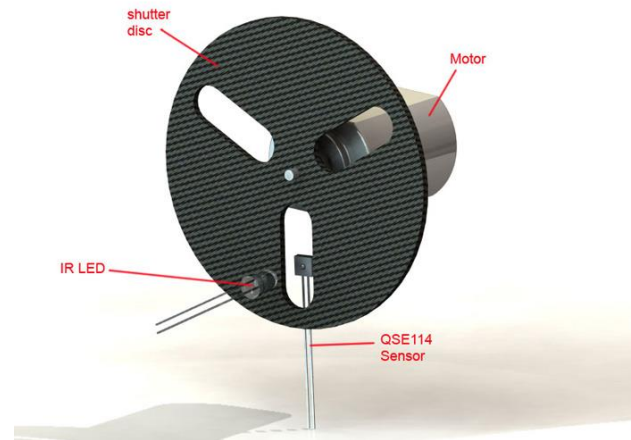
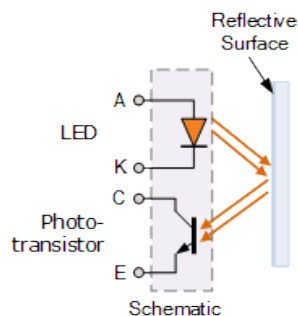
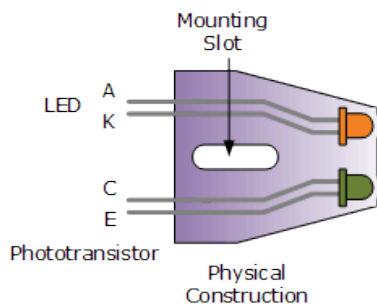
$$u = - \frac{d\Phi}{dt} N$$

- Veľkosť aj frekvencia indukovaného napätia sú závislé od frekvencie otáčania
- Tvar priebehu napätia je daný tvarom feromagnetkej značky
- Zle sa meria pomalé otáčanie ->indukuje sa malé napätie



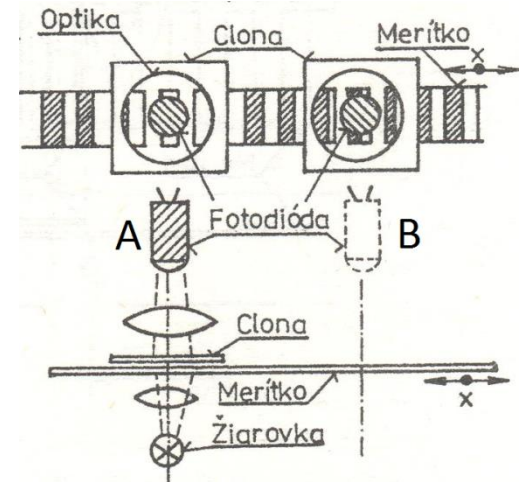
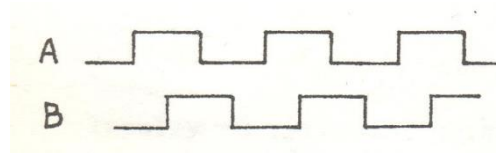
Otáčkomer s optickým senzorm

- Používa sa kotúč s priehľadnými značkami alebo kotúč s nepriehľadnými reflexnými a čiernymi značkami (prípadne sa značky urobia priamo na rotor)
- Priehľadná značka sa sníma tranzmisívnym optočlenom
- Nepriehľadná reflexným optočlenom



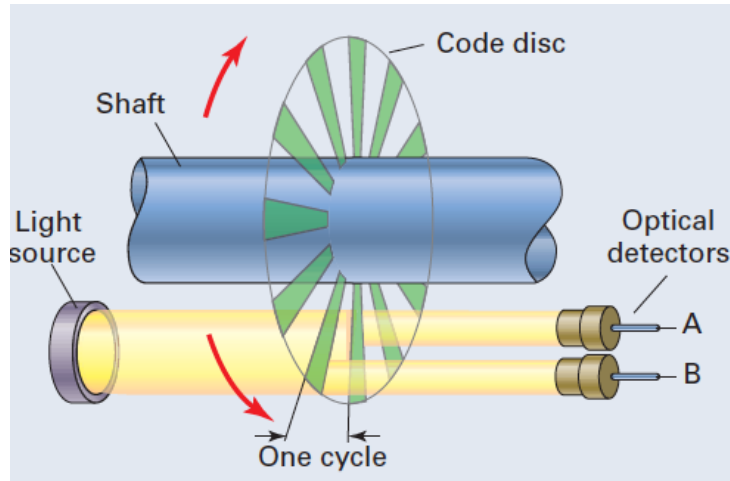
Inkrementálny enkodér I.

- Používajú sa periodicky rozmiestnené značky, ktoré sa snímajú vhodným senzorm (obyčajne optočlenom ale používa sa aj Hallov senzor alebo mechanický kontakt)
- Posunutie a uhol sa zisťuje počítaním impulzov, smer zisťovaním poradia fáz A a B
- Lineárny enkodér
 - posunutie, smer a rýchlosť posúvania



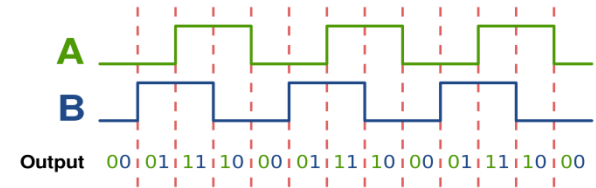
Inkrementálny enkodér II.

- Nevýhody:
 - výpadok napájania-> vynuluje sa čítač->stratí sa údaj o polohe
 - Ľahko sa poškodí a znečistí
- Rotačný enkodér
 - Uhol, frekvencia a smer otáčania



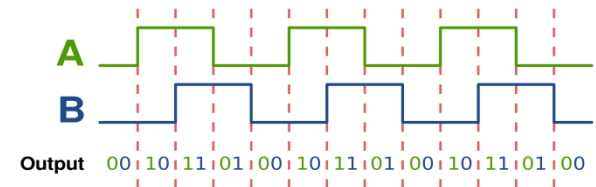
Forward rotation

B "leads" A



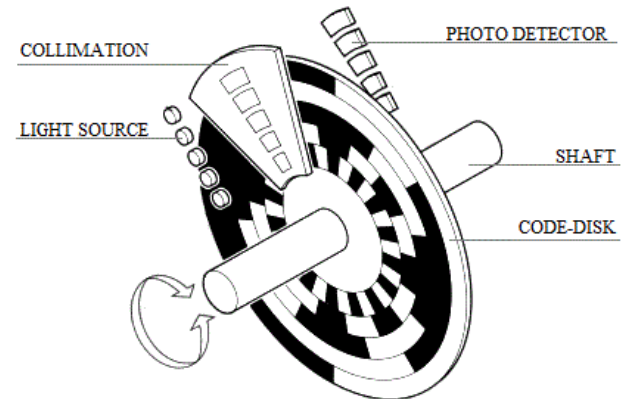
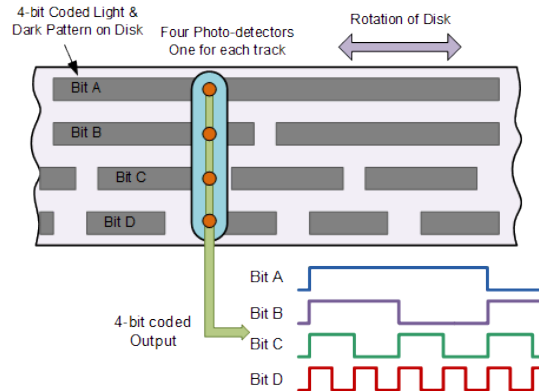
Backwards rotation

A "leads" B



Absolútny enkodér I.

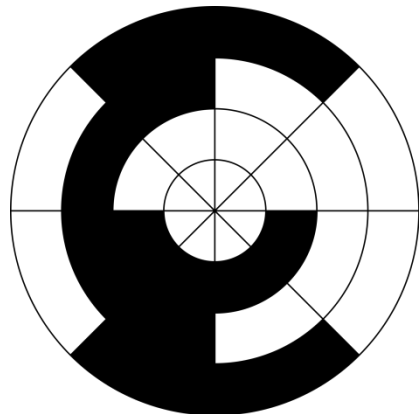
- Používa značky usporiadané do kódového slova v rôznom kóde (napr. binárnom, Grayovom...)
- Rozlíšenie je dané počtom kódových slov 2^N , N je počet bitov slova. (N je niekedy až 16)
- Pri výpadku napájania sa informácia o polohe uchová (v rámci jednej otáčky)



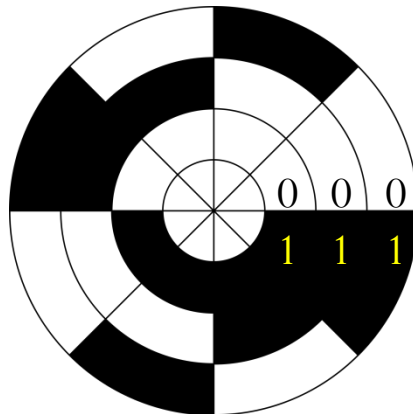
Absolútny enkodér II.

- Obyčajne sa používa Grayov kód - pri binárnom môže dôjsť k chybe
 - ak sa mení viac ako jeden bit naraz, senzory nemusia reagovať súčasne a chvíľu sa indikuje chybná poloha (v Grayovom kóde sa pri posúvaní medzi slovami stále mení iba 1 bit čítaného slova)

Grayov kód



Binárny kód



Náhodne sa mení stav
medzi slovami (treba zmeniť 3 bity naraz):

000 – správna poloha

010 → chyba

011 → chyba

111 – správna poloha