



8.

Senzory magnetického pole

(Hallův jev, Magnetoodpor, Magnetodioda
Magnetotranzistor, SQUID, SAW)

Přednášející: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

husak@fel.cvut.cz

<http://micro.feld.cvut.cz>

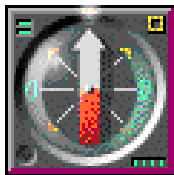
tel.: 2 2435 2267

Cvičící:

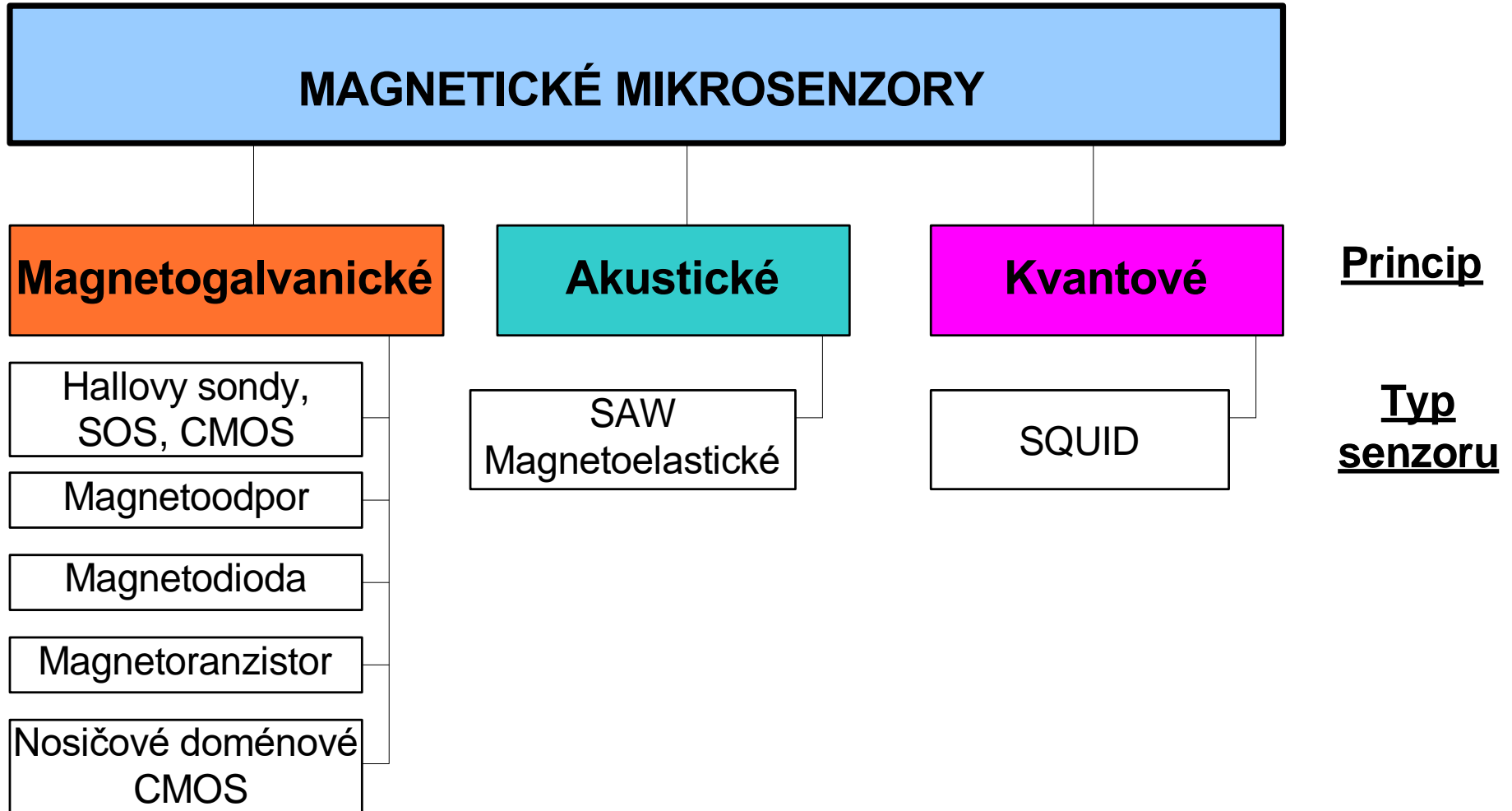
Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

Ing. Tomáš Teplý



Senzory magnetických veličin – rozdělení

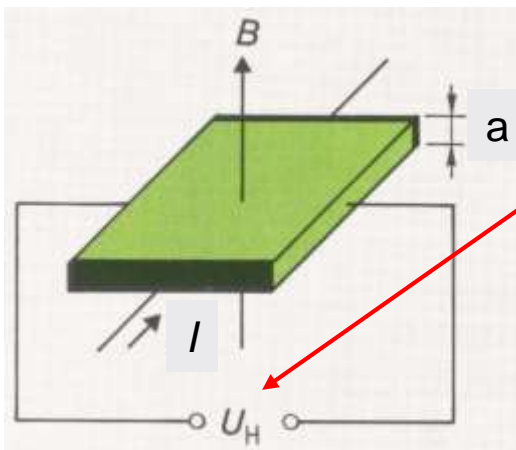


A) Senzory s Hallovým jevem



Hallův senzor – princip činnosti

Princip činnosti

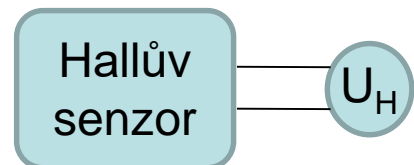


$$U_H = \frac{R_H}{a} \cdot B \cdot I$$

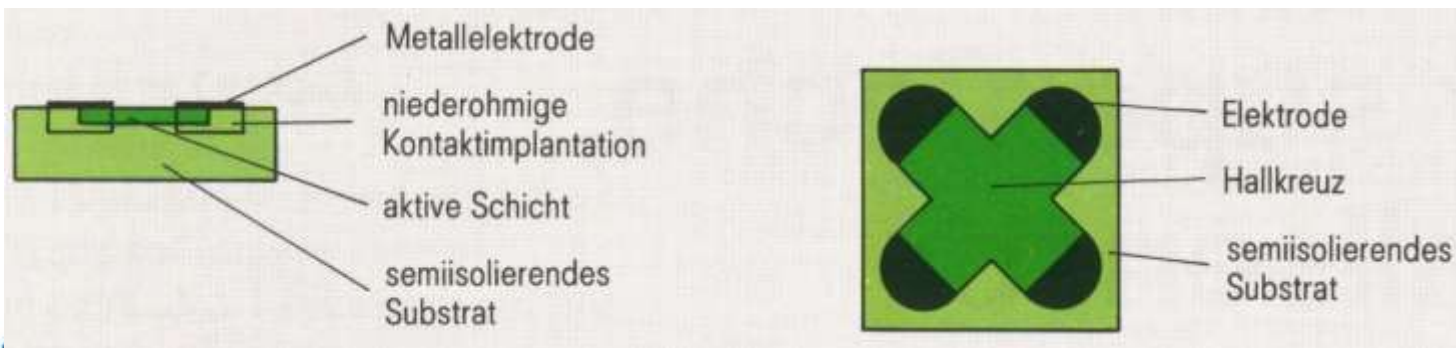
U_H – Hallovo napětí
 B – magnetická indukce
 I – proud čipem
 a - tloušťka destičky
 R_H - Hallova konstanta

? Senzor magnetického pole s Halovým jevem: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti Hallova senzoru, Napište základní rovnici pro výpočet Hallova napětí.

Vyhodnocování signálu

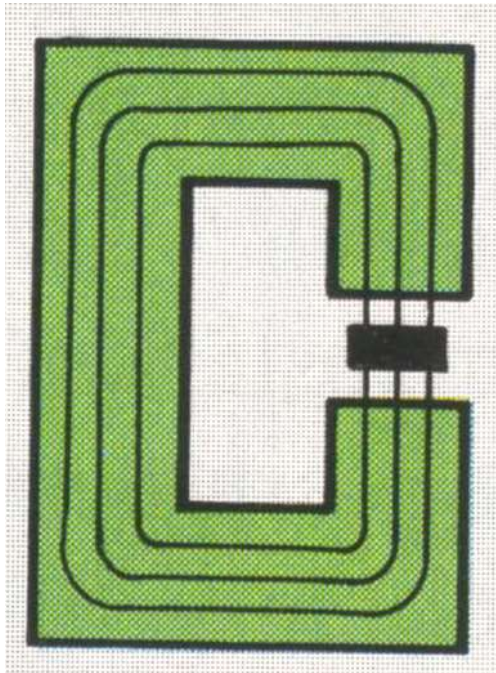
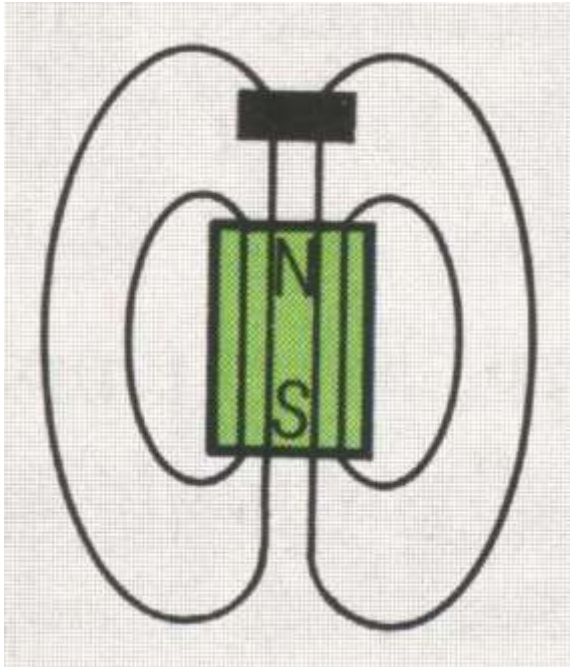
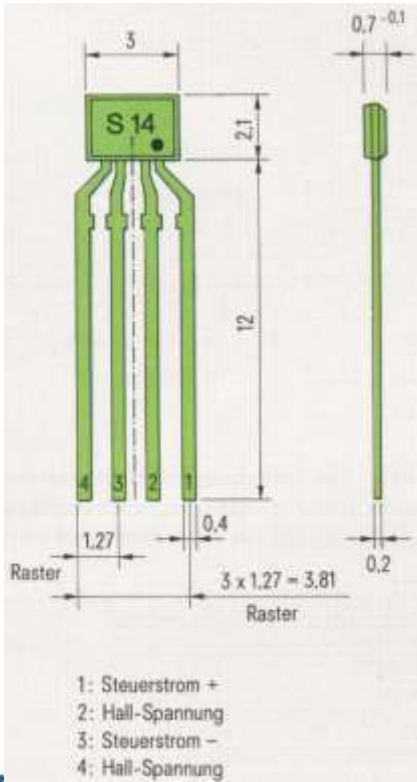


Struktura GaAs čipu



Hallova konstanta R_H , Pohyblivost μ_e , Energetický pás E_g

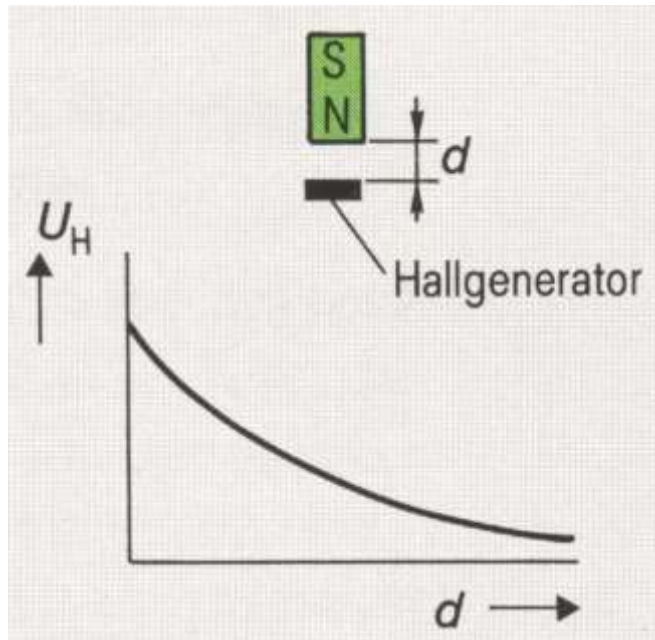
Material	R_H in cm^3/As	μ_e in cm^2/Vs	E_g in eV
Metals	10^{-4}	10	–
Ge	10^{+3}	3900	0.75
Si	10^{+6}	1500	1.16
InSb	380	77000	0.23
GaAs	10^{+4}	8000	1.52



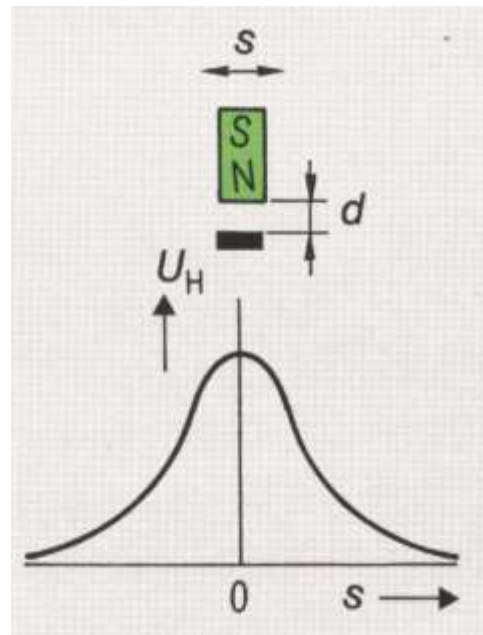
Hallův senzor – princip měření vzdálenosti a posuvu

Zkouška

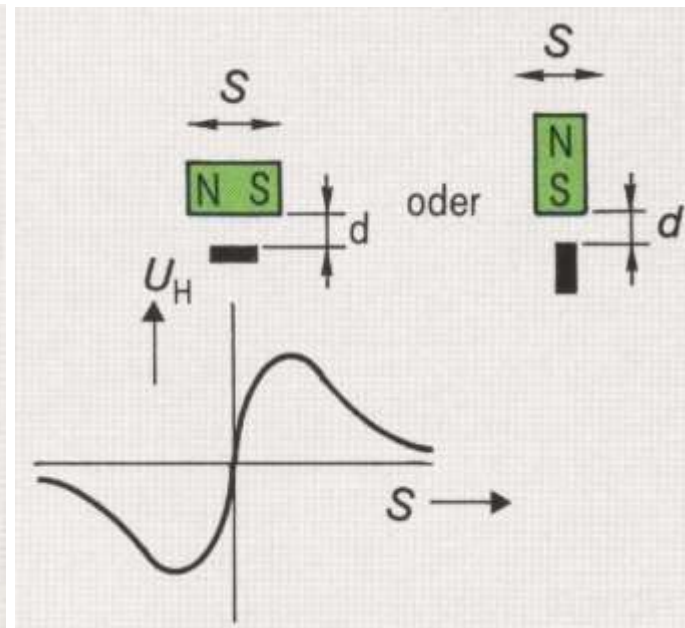
vzdálenost - d



posuv - S



posuv S – diferenciální

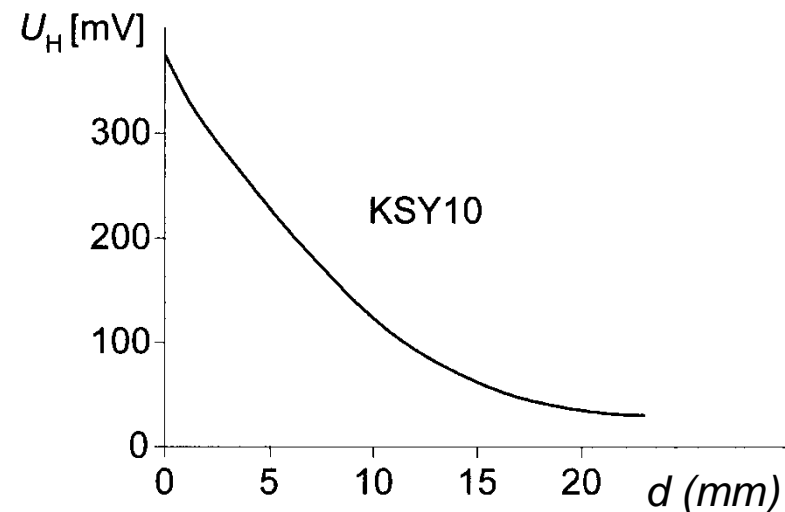
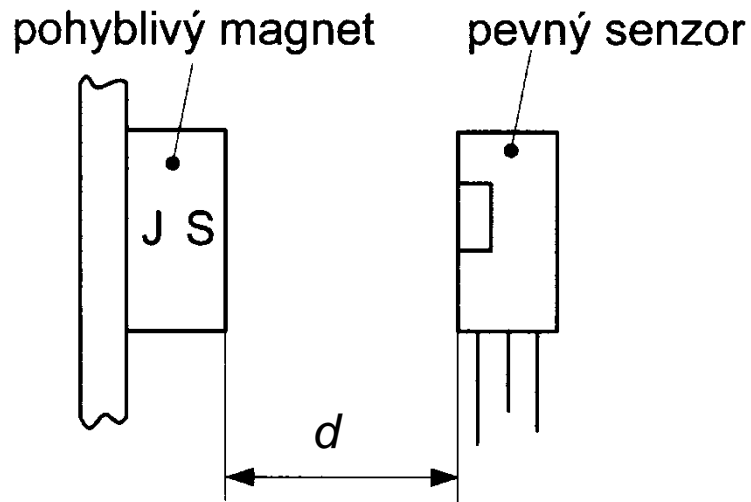
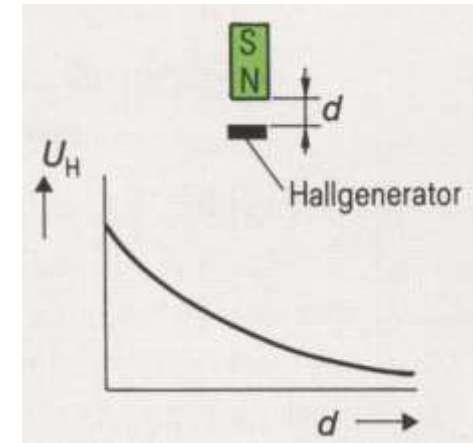


$$U_H = \frac{R_H}{a} \cdot B \cdot I$$

? Měření vzdálenosti a posuvy s Halovým senzorem: Nakreslete a vysvětlete princip měření vzdálenosti a posuvu

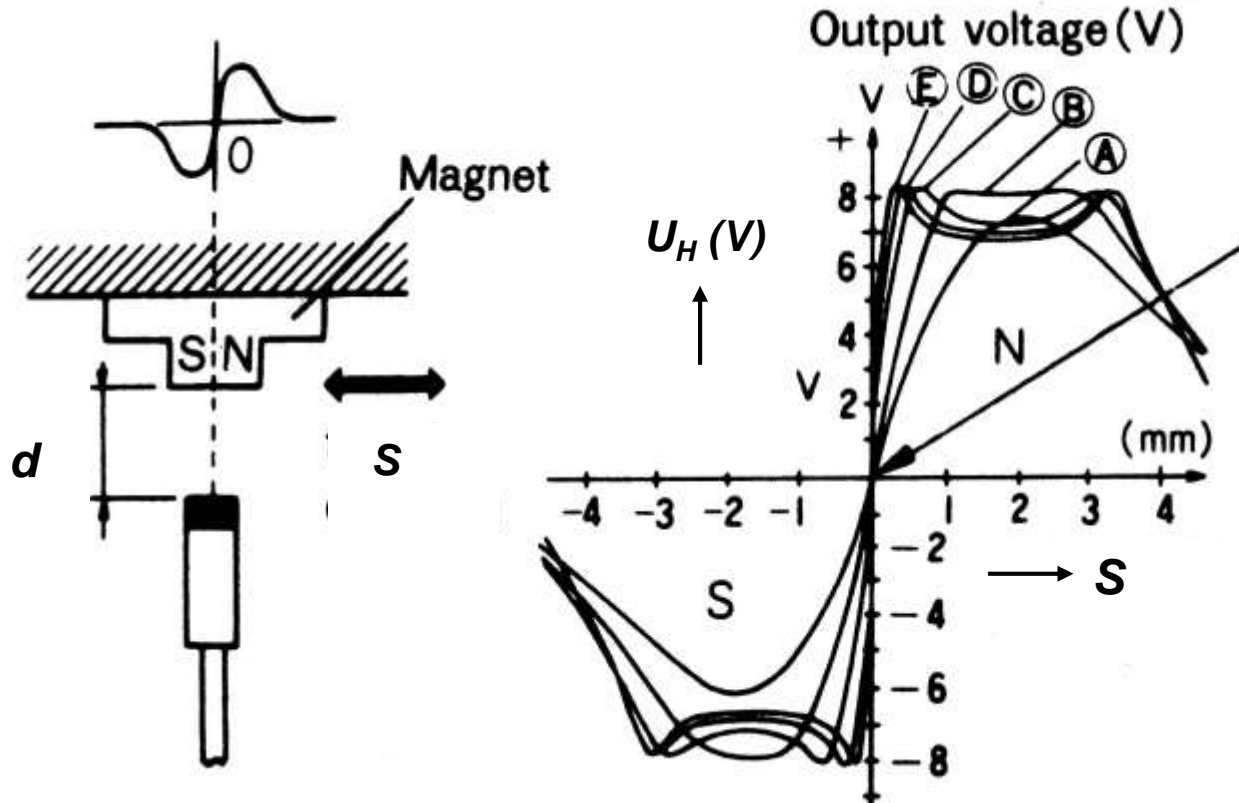
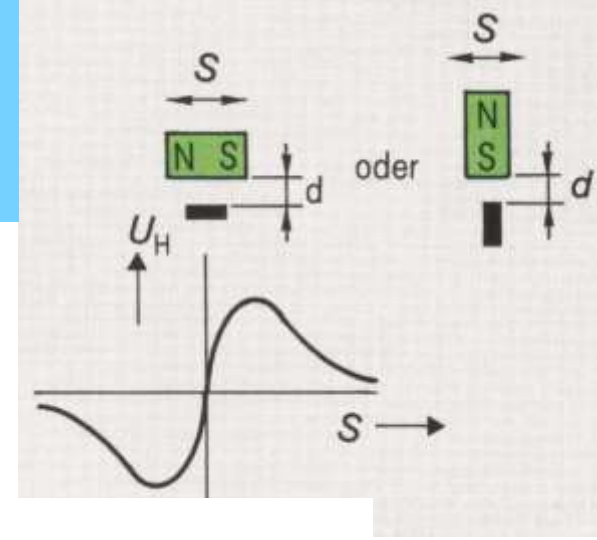
Hallův senzor – princip měření vzdálenosti d

Příklad: měření vzdálenosti



Hallův senzor – princip měření vzdálenosti d , chyba měření

Příklad: Diferenciální posuv



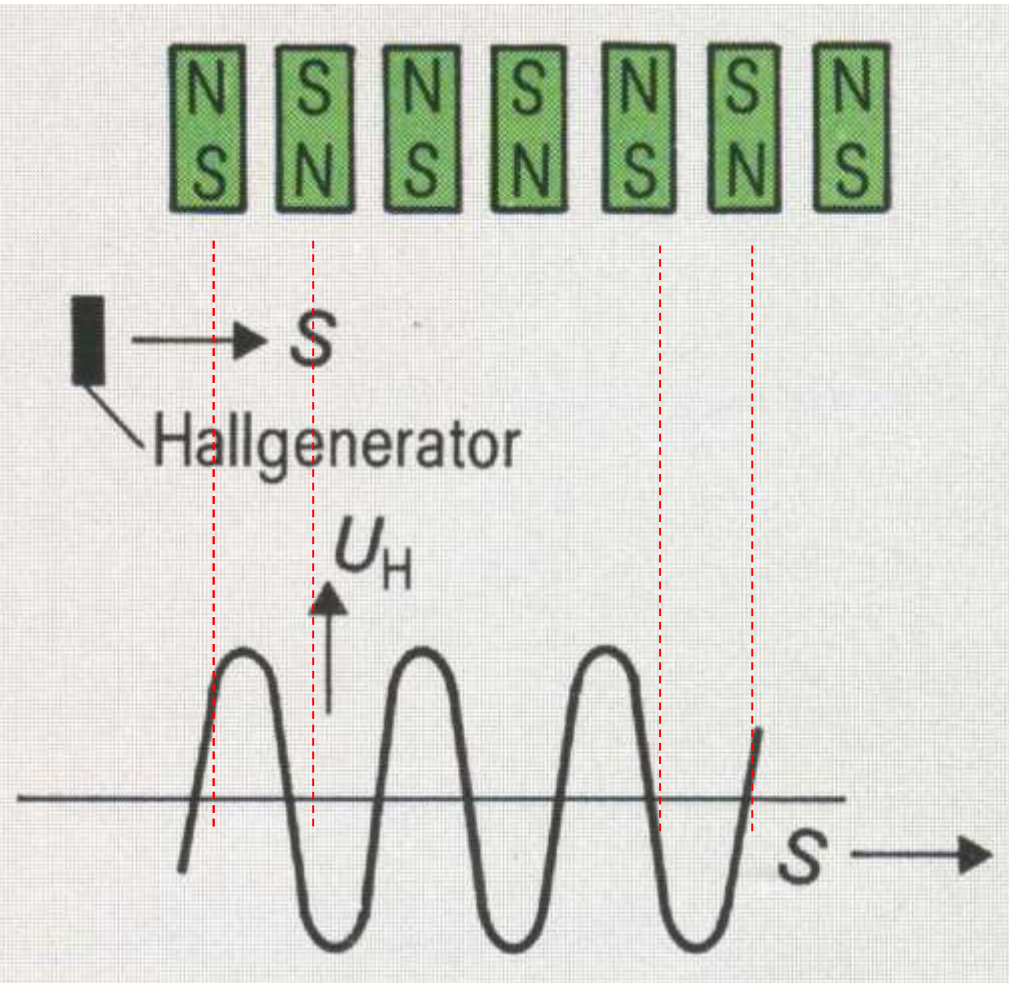
$\pm 0.1 \mu\text{m}$
Repeatability point

Vzdálenost d

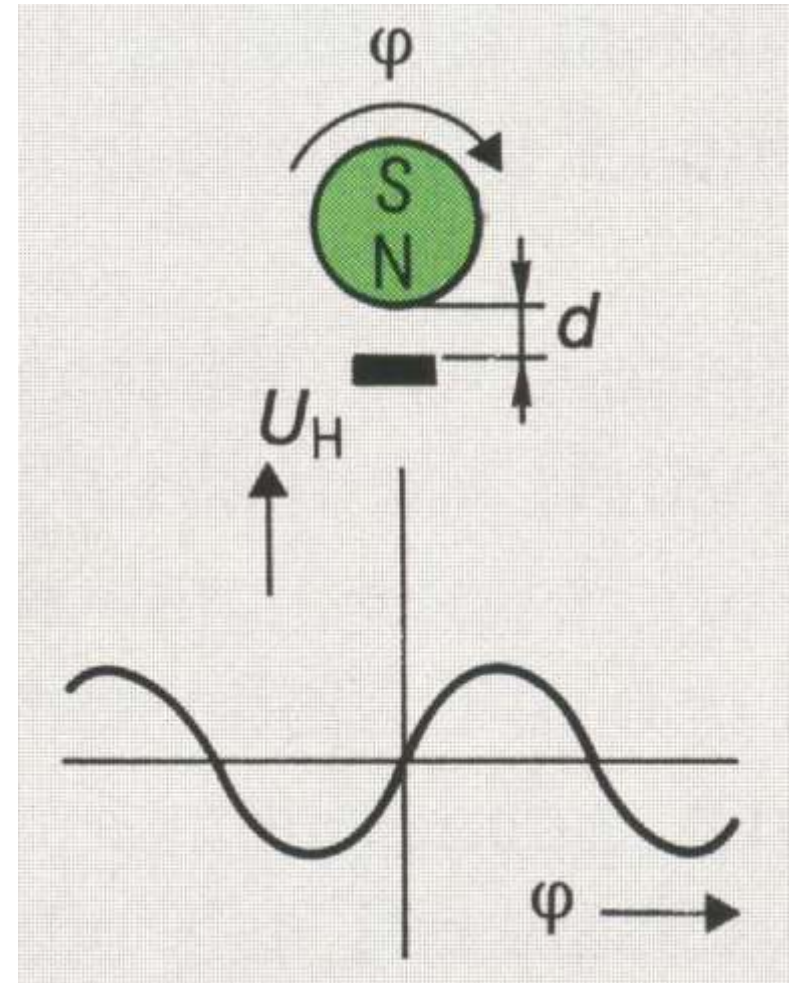
- Ⓐ = 2
- Ⓑ = 1.5
- Ⓒ = 1
- Ⓓ = 0.5
- Ⓔ = 0.2

Hallův senzor – princip měření posuvu S a úhlu natočení

Příklad: Digitální senzor posunutí



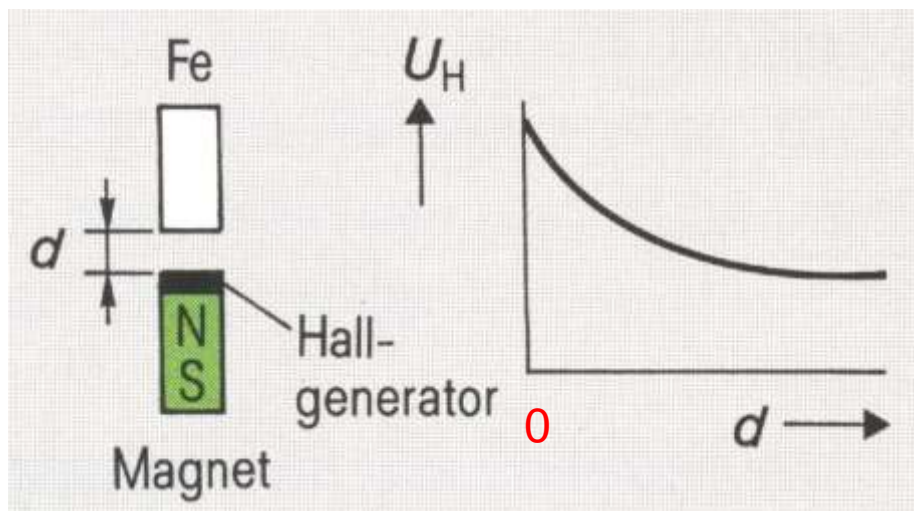
Příklad: Měřič úhlu natočení
- digitální senzor otáček



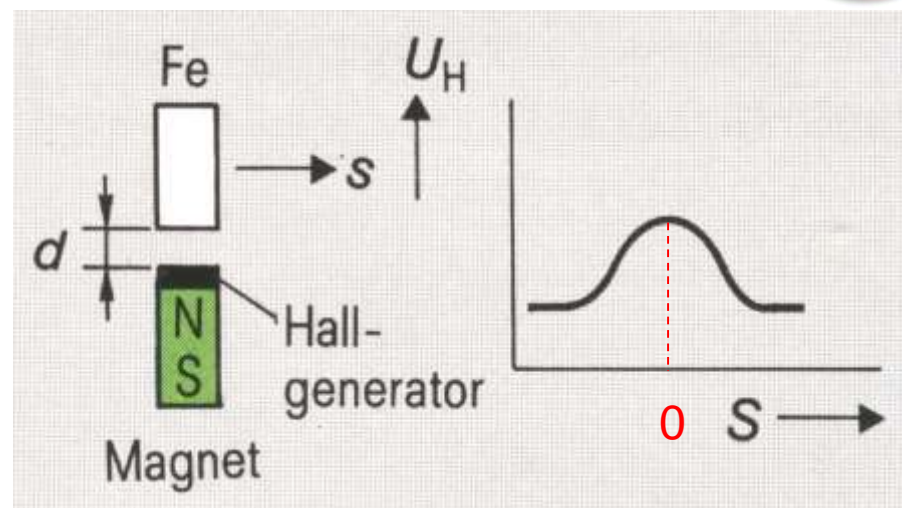
Hallův senzor – princip měření vzdálenosti a posuvu

Zkouška

Přiblížení feromagnetika



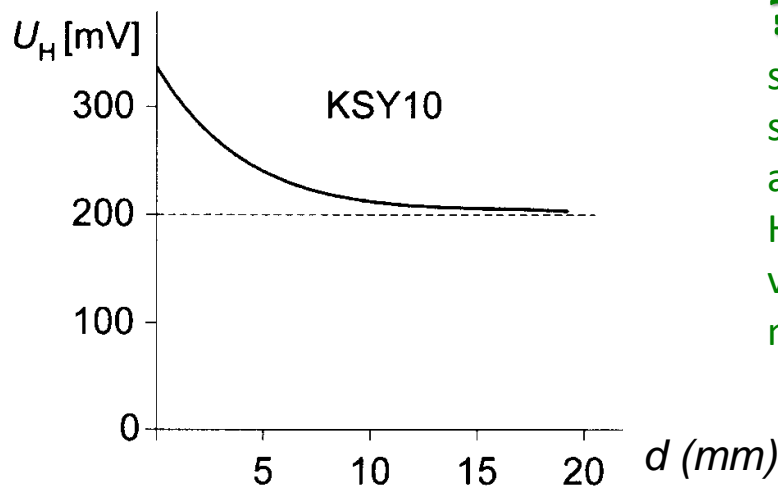
Posuv feromagnetika



Příklad: Přiblížení feromagnetika

pohyblivý předmět

pevný senzor s magnetem

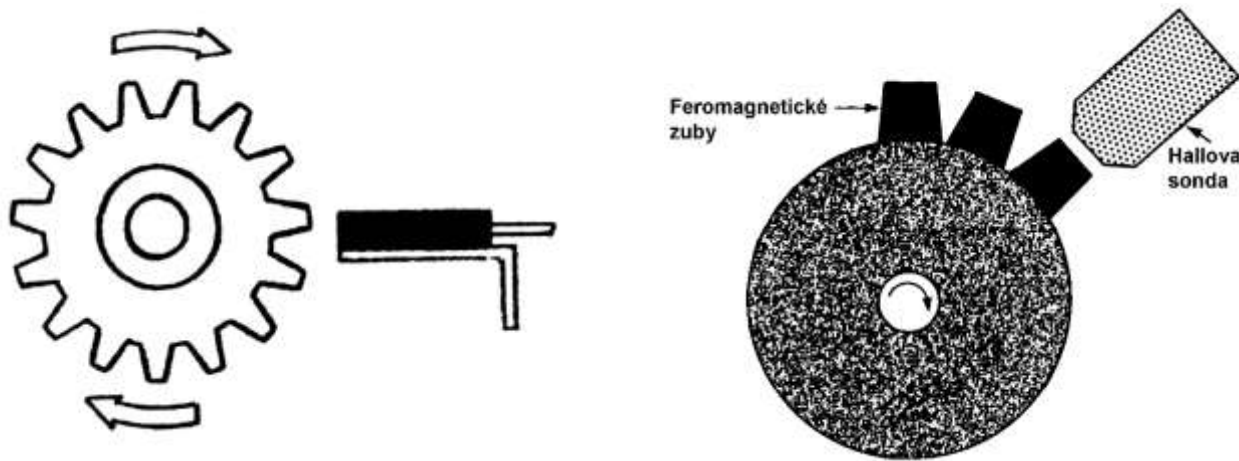
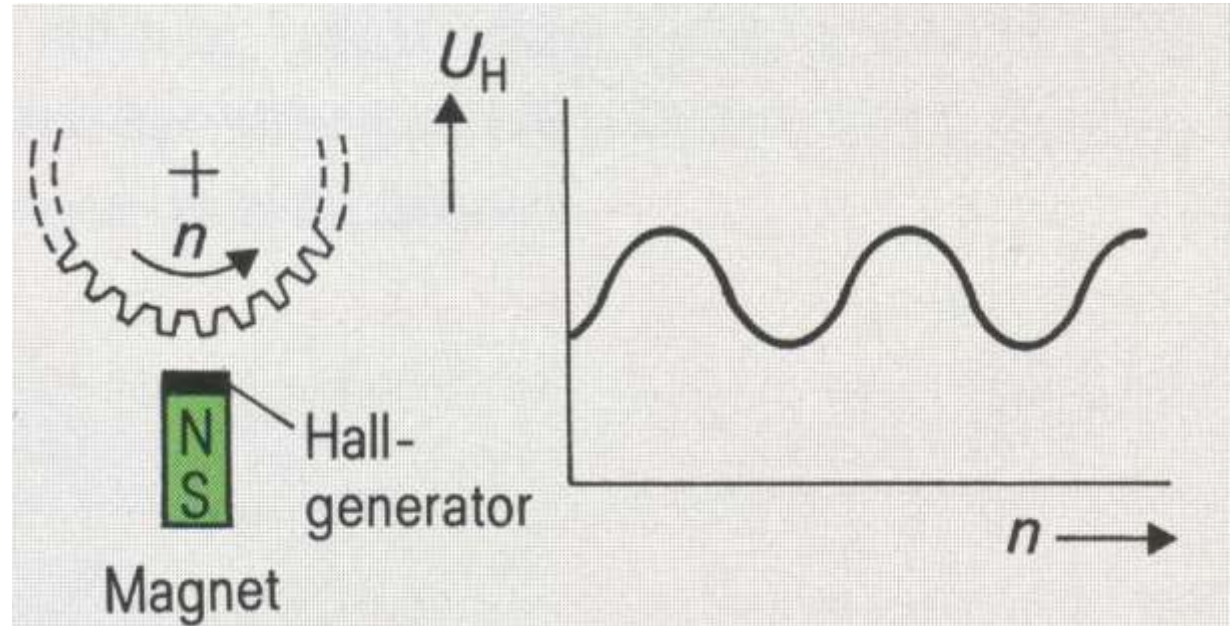


? Měření vzdálenosti s Hallovým senzorem v režimu s feromagnetikem: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti Hallova senzoru v režimu využití feromagnetika pro měření vzdálenosti



Hallův senzor – princip měření otáček

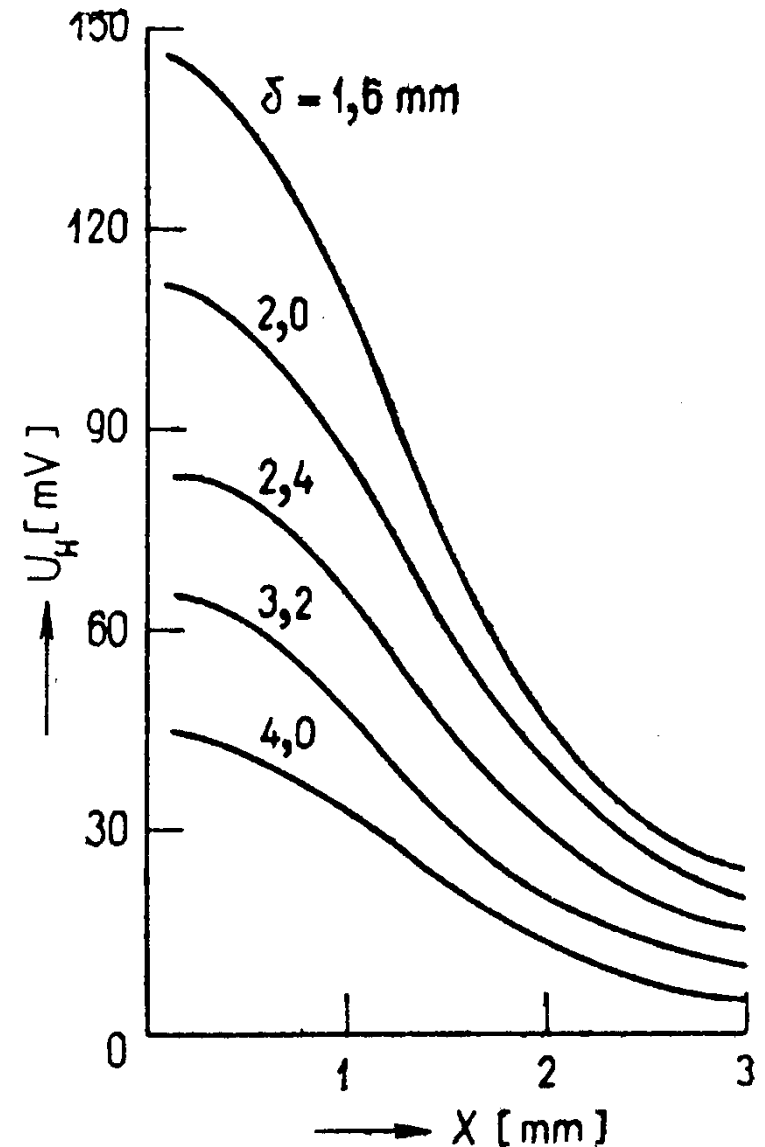
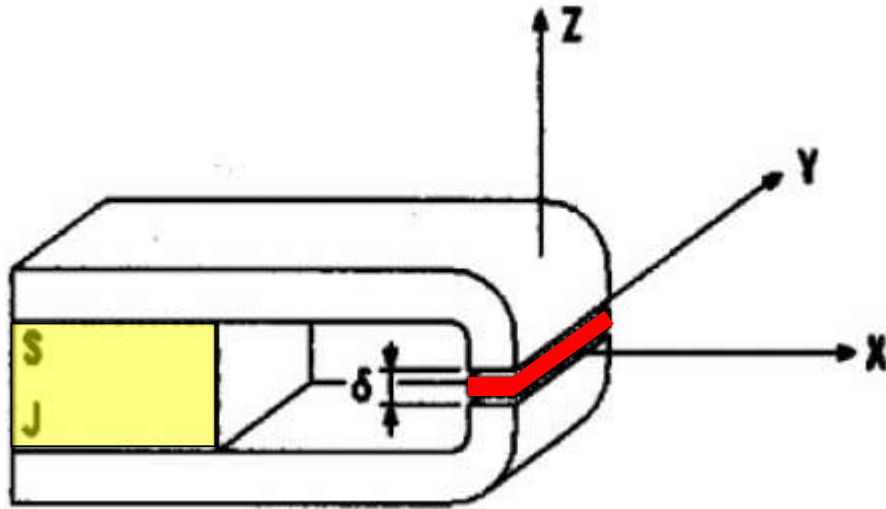
Příklad: Digitální měřič otáček na principu posuvu feromagnetika



Hallův senzor – princip měření posuvu x

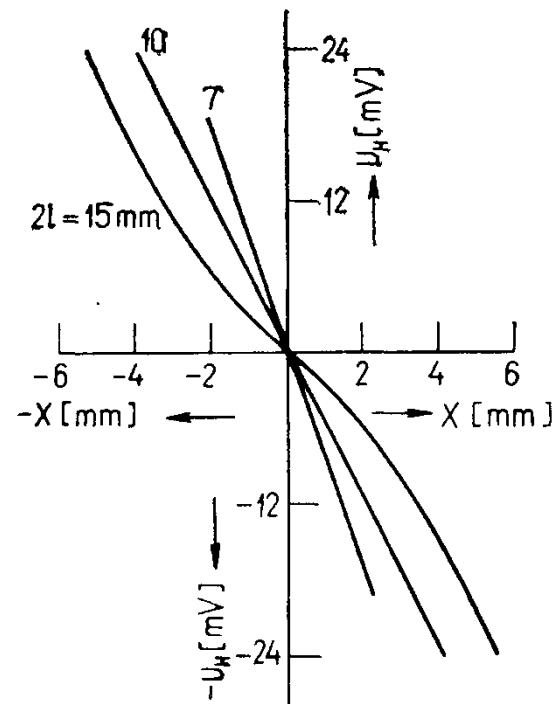
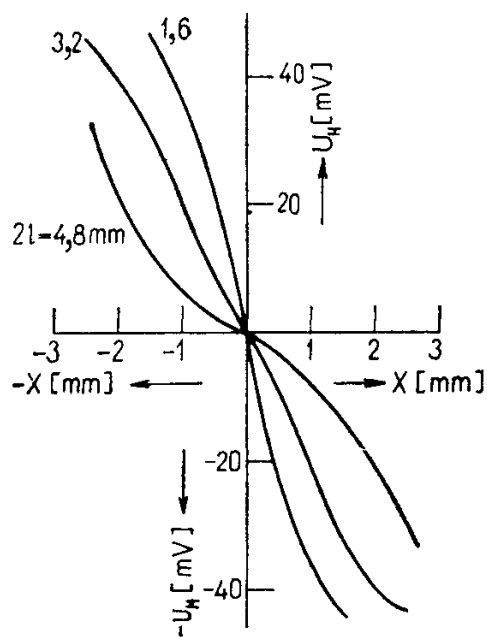
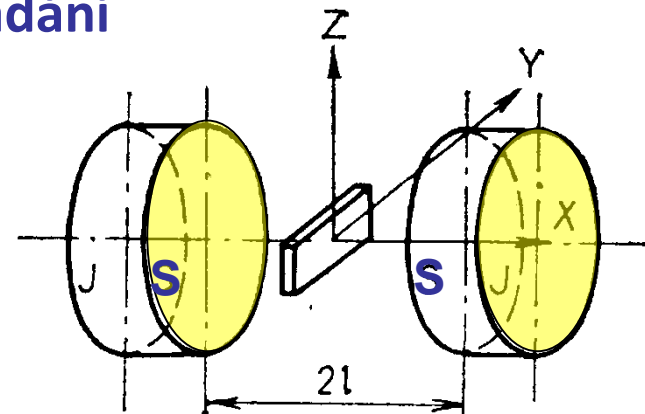
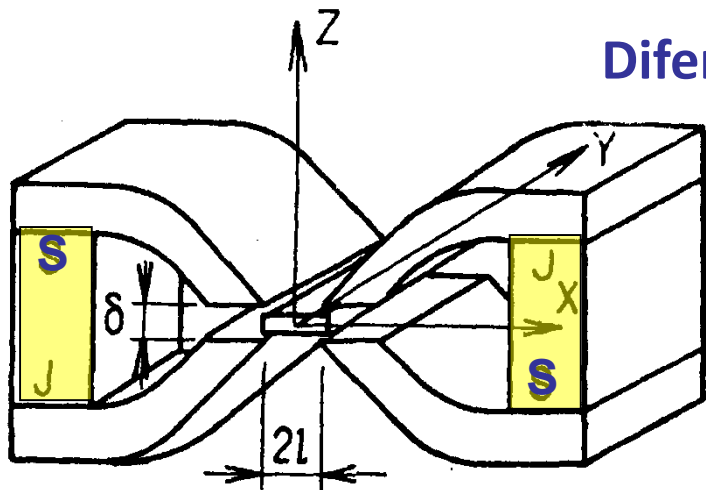
Příklad – měření posunutí x

$$U_H = \frac{R_H}{a} \cdot B \cdot I$$



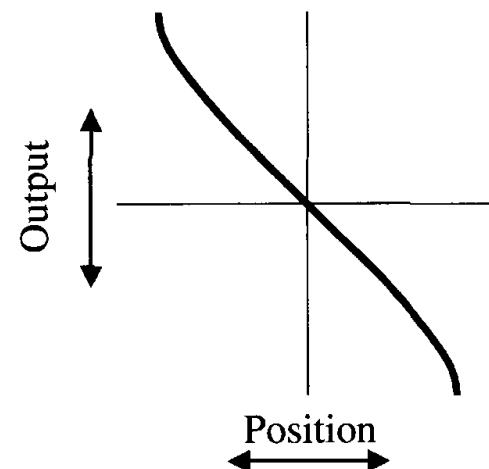
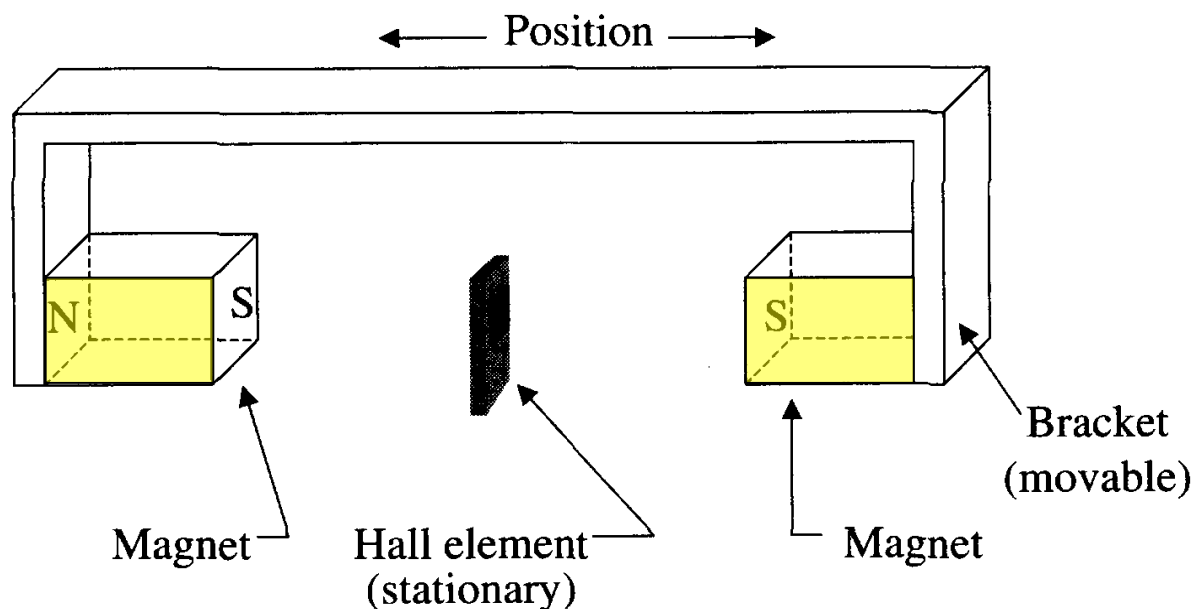
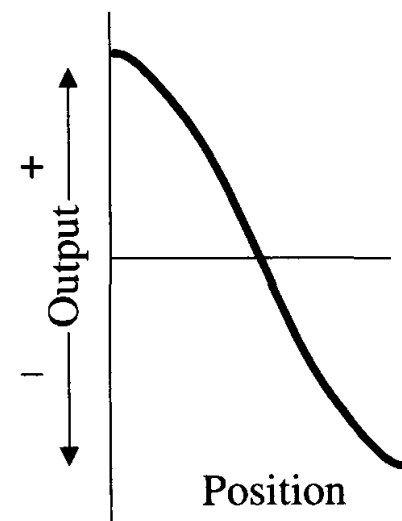
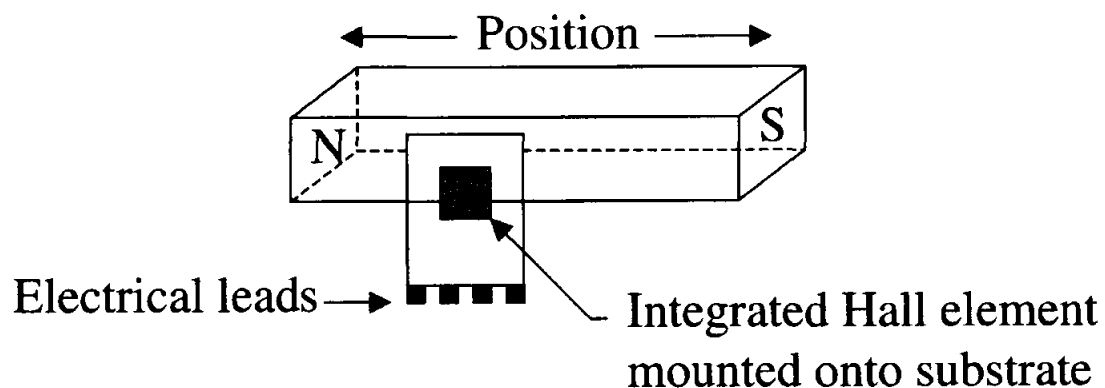
Hallův senzor – princip měření posuvu x

Diferenciální uspořádání



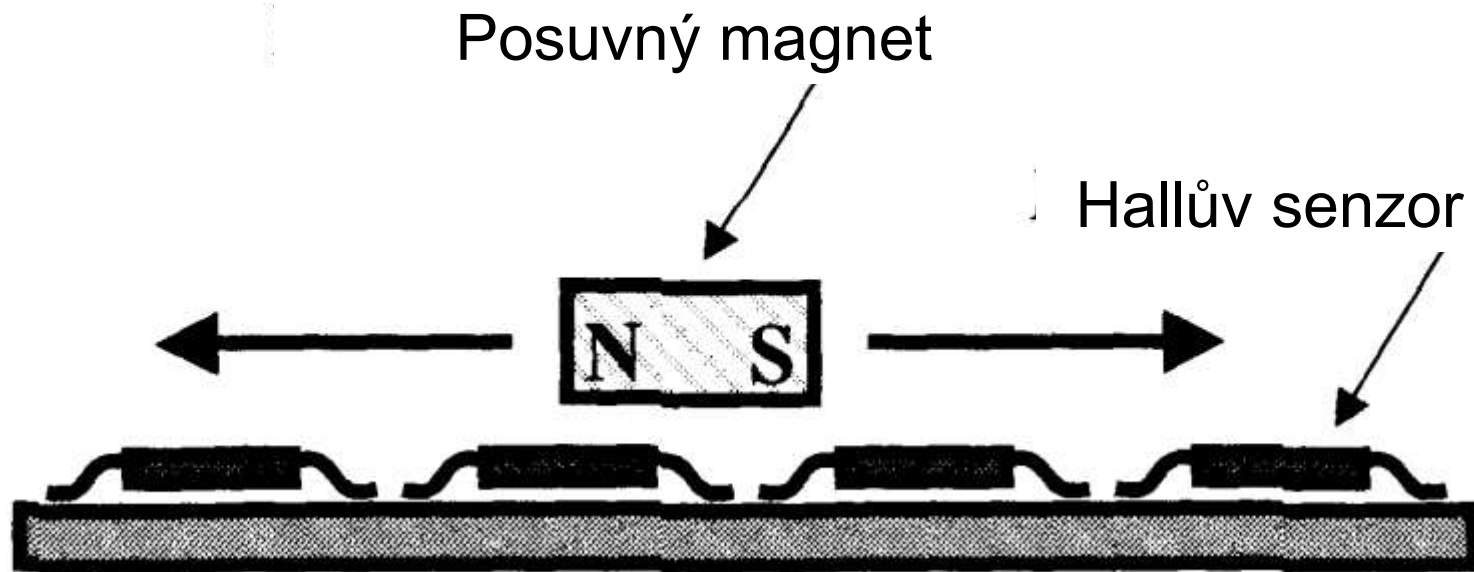
Hallův senzor – měření velkého posuvu

Úpravy pro měření velkého posunutí



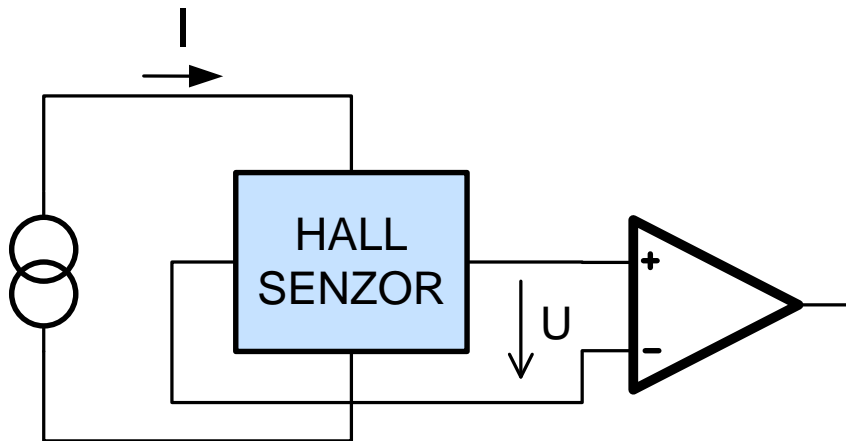
Hallův senzor – měření velkého posuvu

Úpravy pro měření velkého posunutí – lineární řada senzorů



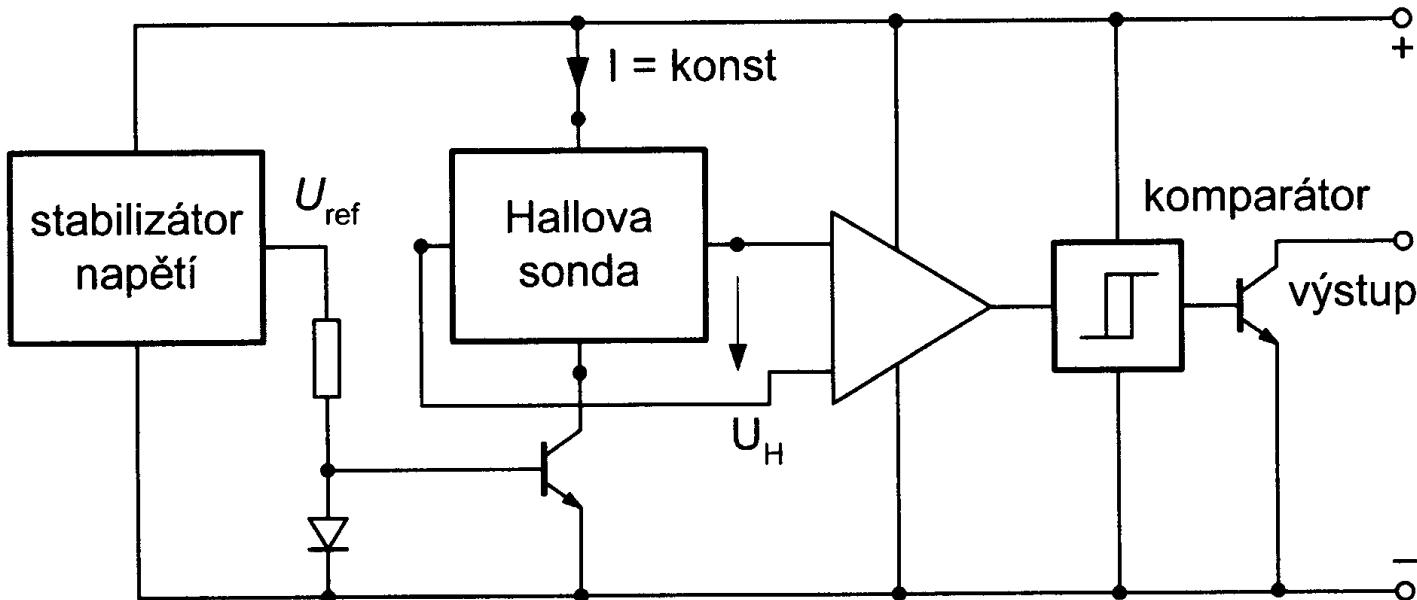
Hallův senzor – vyhodnocování signálu ze senzoru

Zkouška



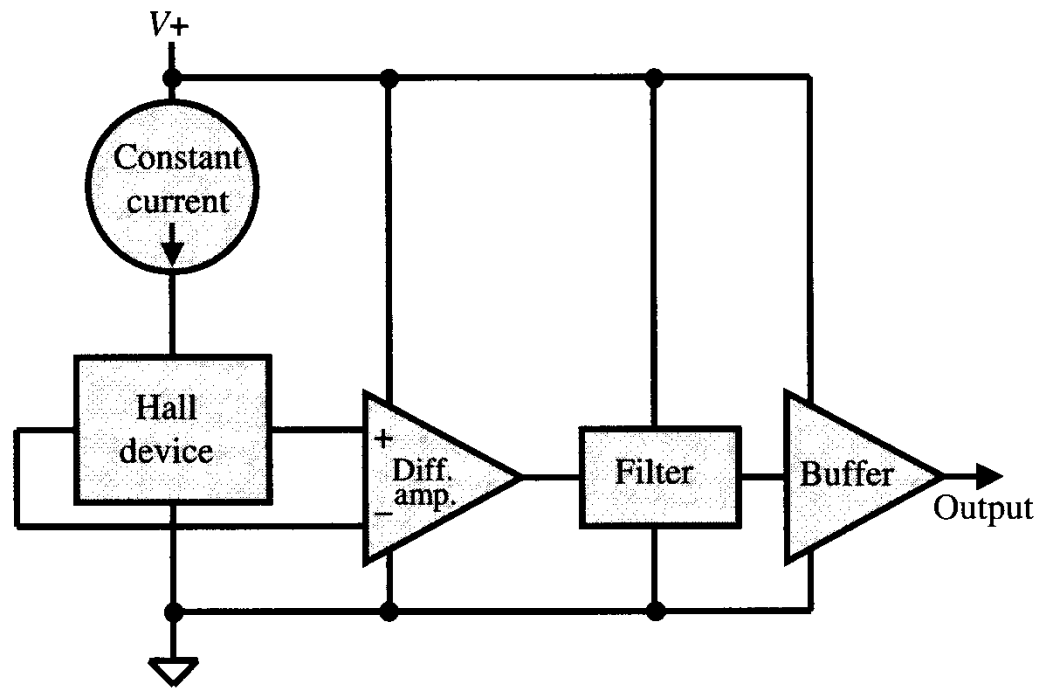
? Vyhodnocování signálu z Hallova senzoru: Nakreslete zjednodušeně princip zapojení senzoru pro vyhodnocování signálu (vyhodnocovací obvod) a vysvětlete jeho činnost

Vnitřní bloková struktura Hallova senzoru

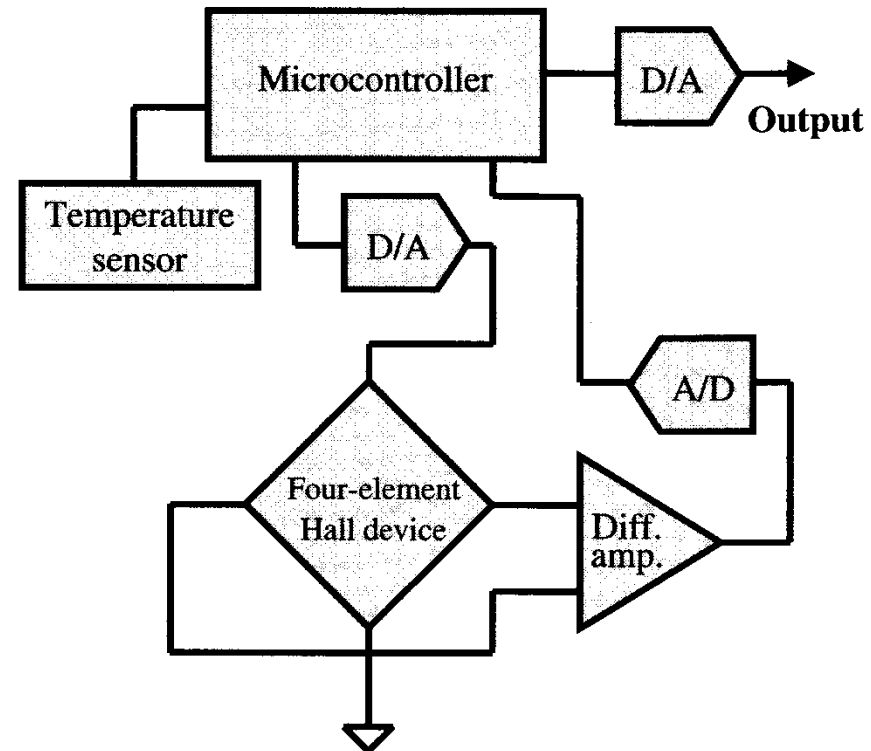


Hallův senzor – vyhodnocování signálu ze senzoru

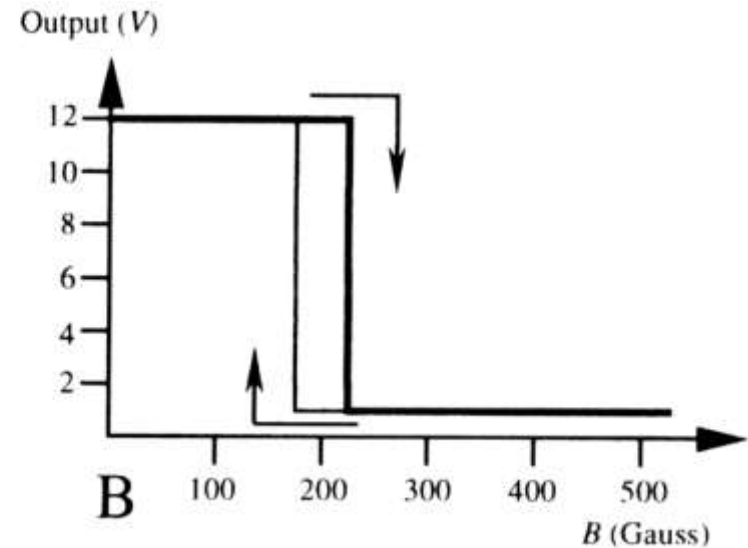
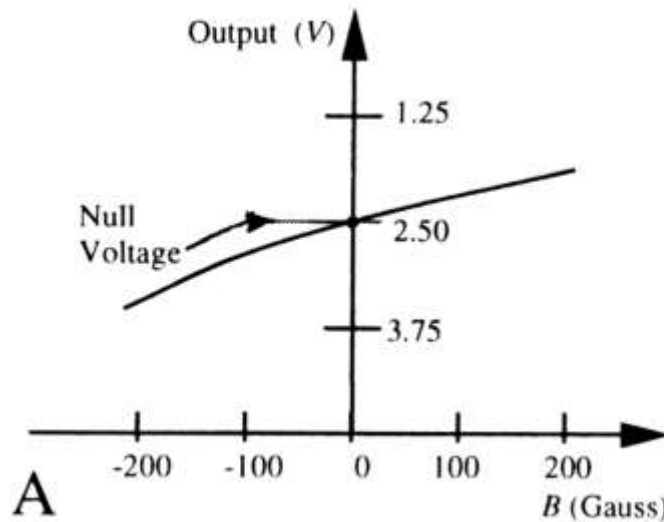
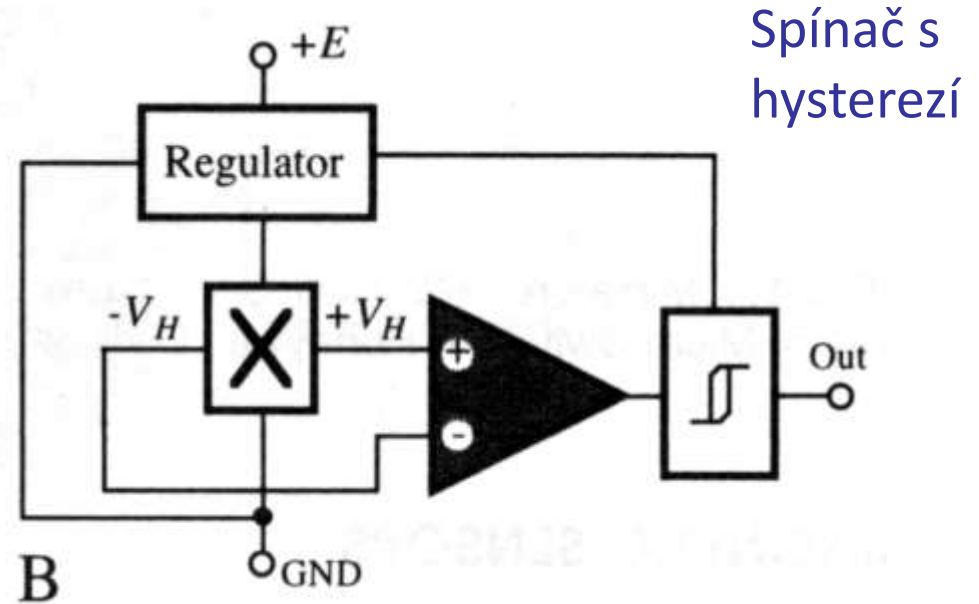
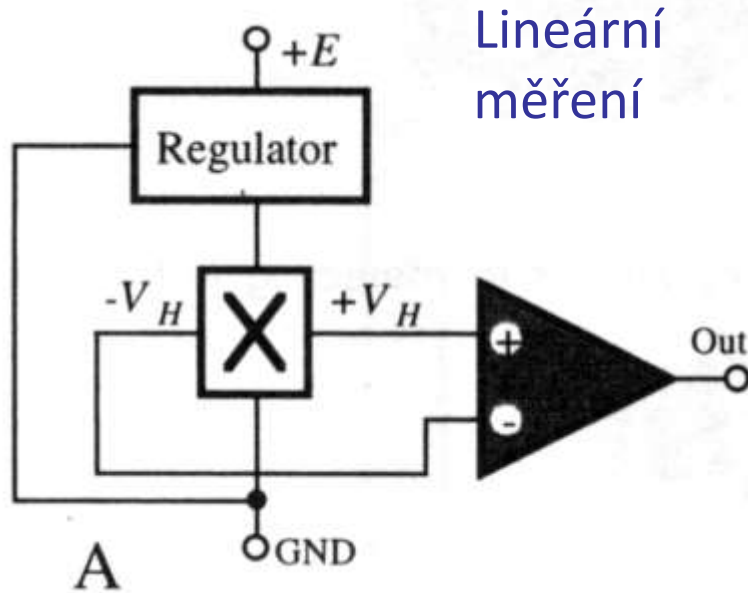
Analogové zpracování



Digitální zpracování

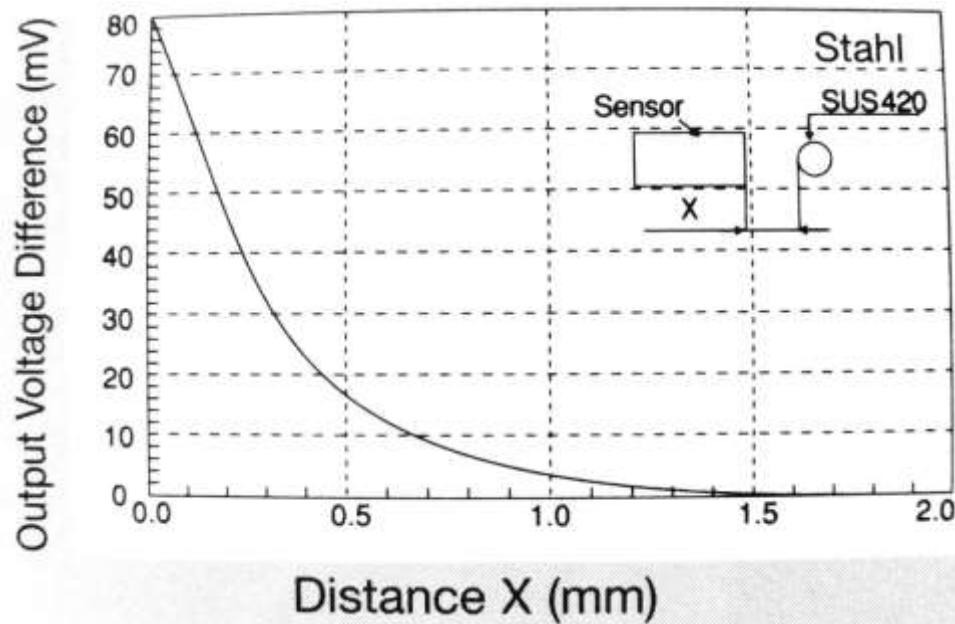
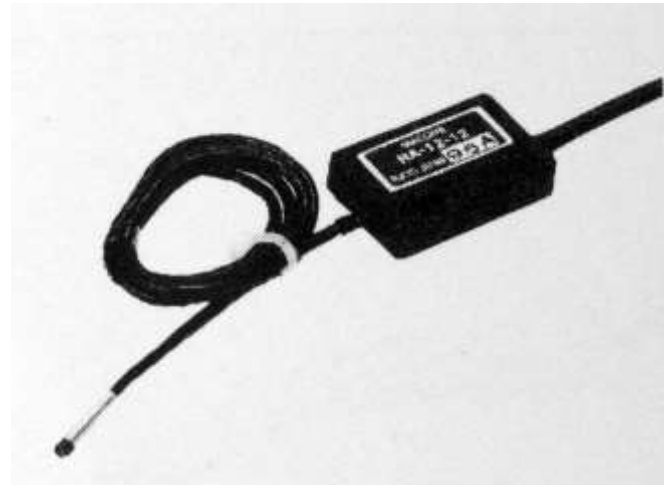
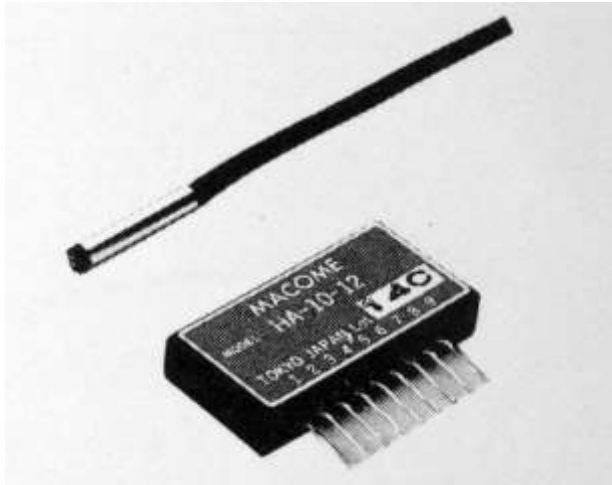


Hallův senzor – vyhodnocování signálu ze senzoru





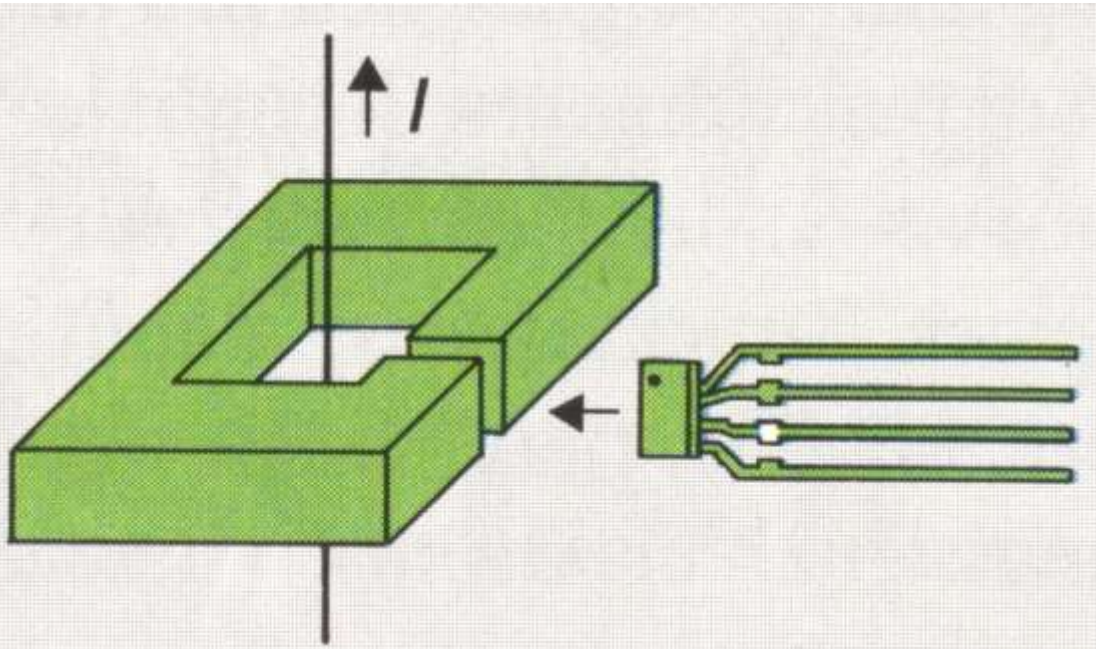
Hallův senzor – aplikace



firma Pewatron

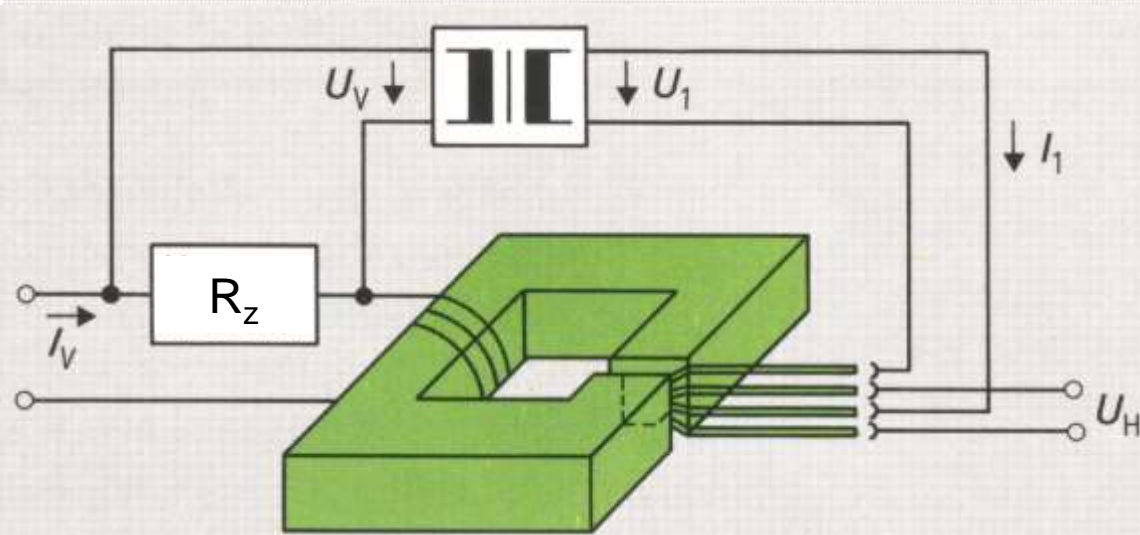


Hallův senzor – měření proudu a výkonu



S proudovými transformátory

$$U_H = \frac{R_H}{a} \cdot B \cdot I$$



Měření příkonu spotřebiče

U_H je úměrné příkonu

Hallův senzor – měření proudu (Honeywell)

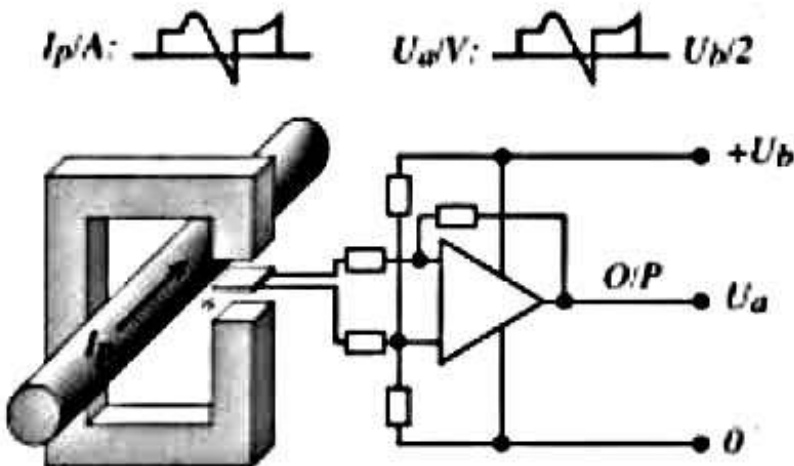
Princip otevřené smyčky

Hallův senzor - lineární závislost $U_H = \text{konst} \cdot B$

Sestava - integrovaný Hallův generátor a 3 odpory na keramickém podkladu. Citlivost a teplotní kompenzace - se nastavuje úpravou dvou R laserem.

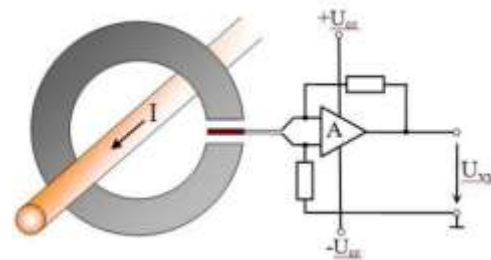
V senzoru je integrovaný i stabilizátor napětí a teplotně kompenzovaný měřicí zesilovač.

Výstupní napětí U_a proudového senzoru je úměrné primárnímu proudu I_p



★ Hallův generátor

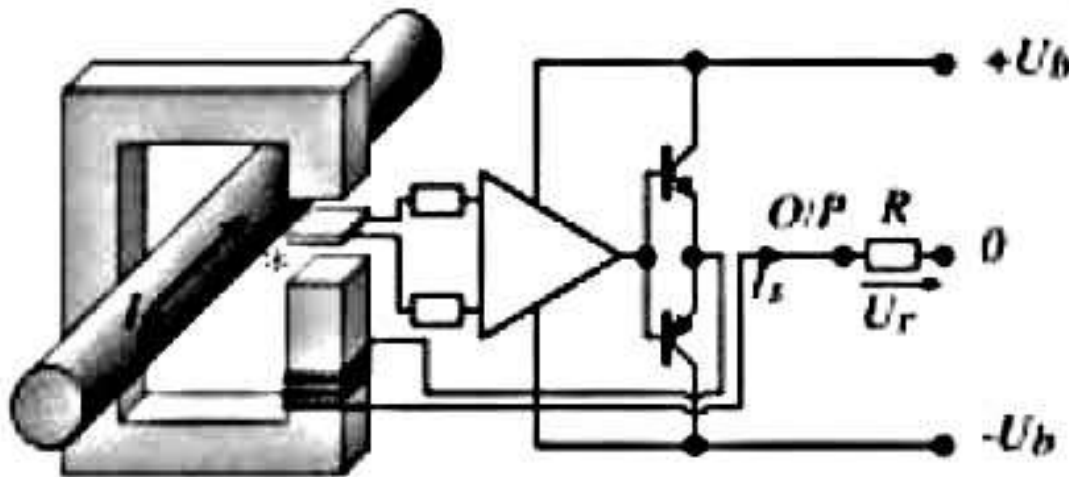
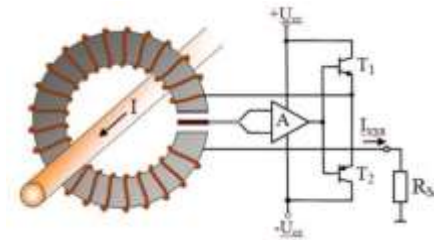
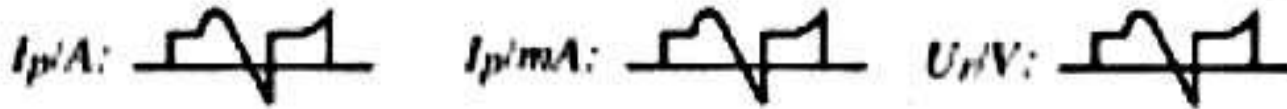
$$U_a = U_b/2, \text{ jestliže } I_p = 0$$



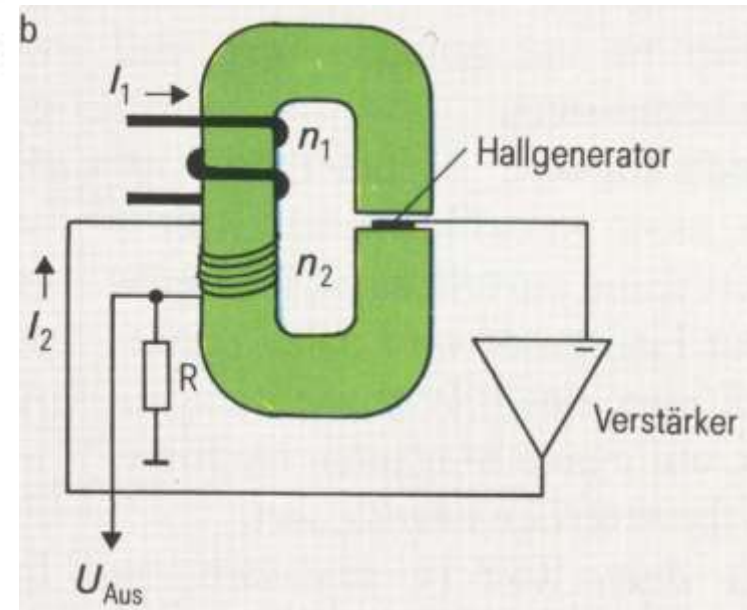
Hallův senzor – měření proudu (Honeywell)

Princip uzavřené smyčky

- B od primárního proudu je kompenzováno opačným B z pomocného vinutí.
- Odchylka od nulového vyvážení B vytváří napětí na Hallovém senzoru.
- Kompenzační proud je řízen zesilovačem a napětím z Hallova senzoru.
- Na vnějším výkonovém odporu R lze získat výstupní napětí.

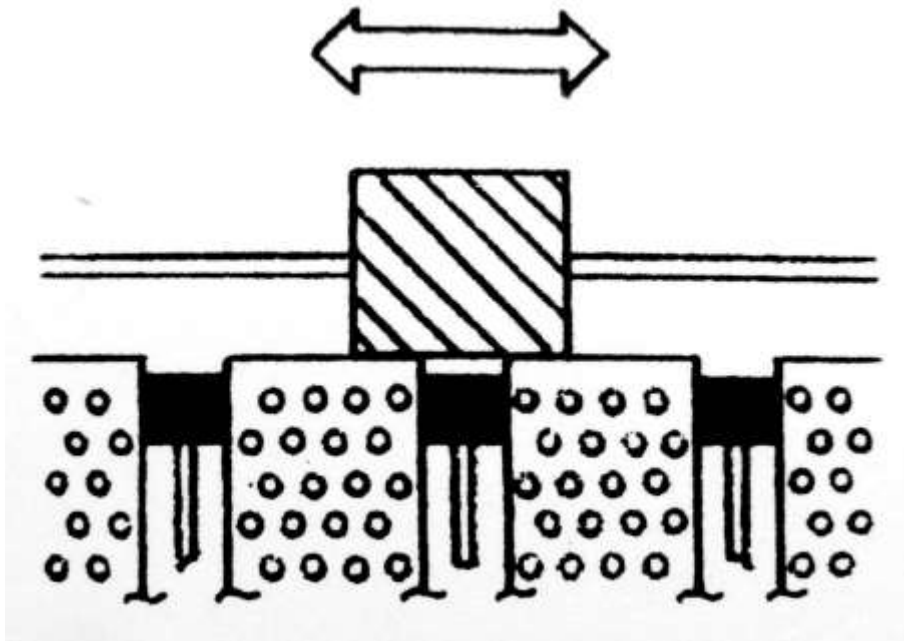


* Hallův generátor

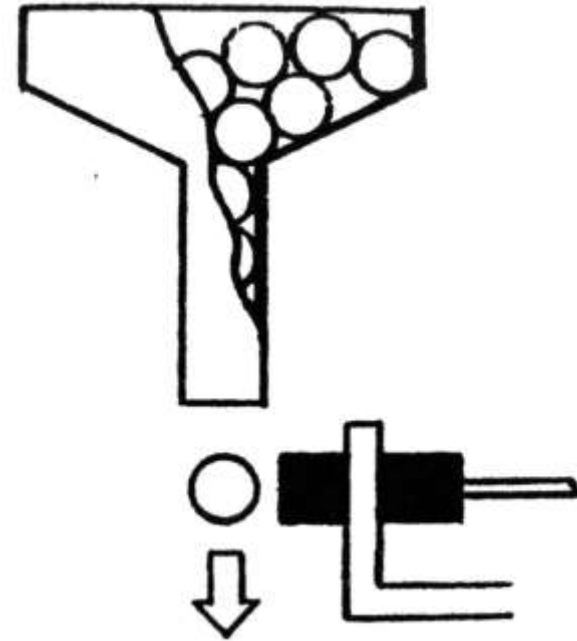


Hallův senzor – aplikace počítání předmětů

Kontrola na výrobní lince

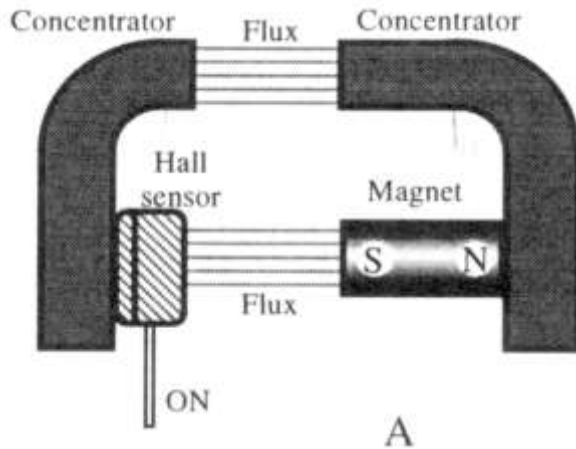


Počítání Fe kuliček

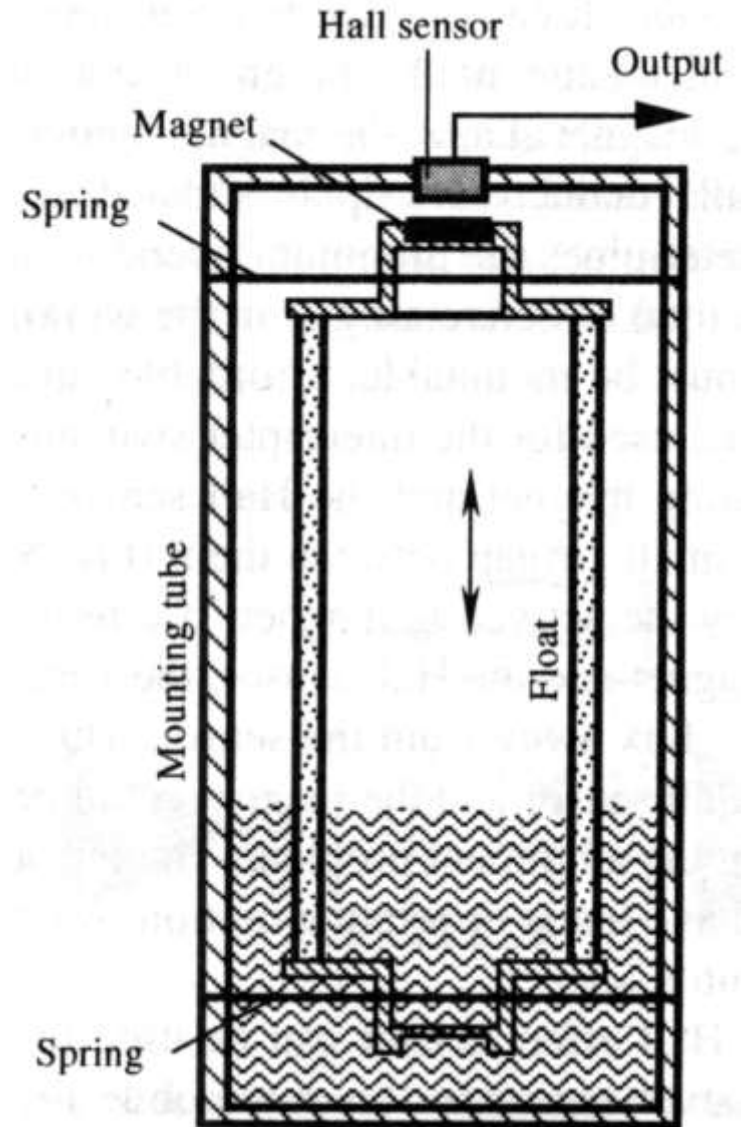


Hallův senzor – spínač, hladinový spínač

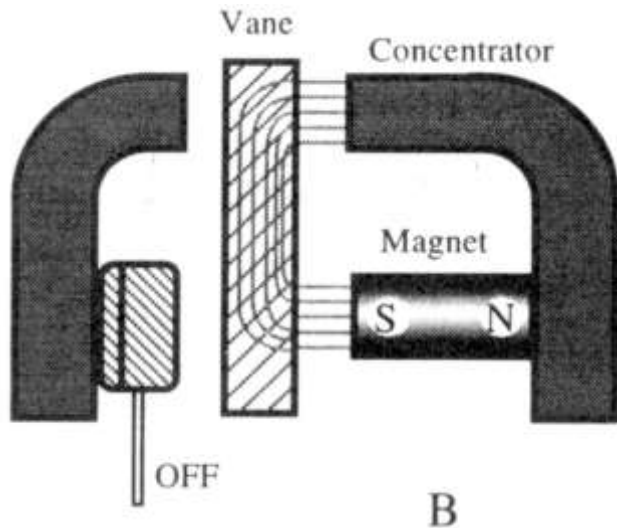
sepnuto



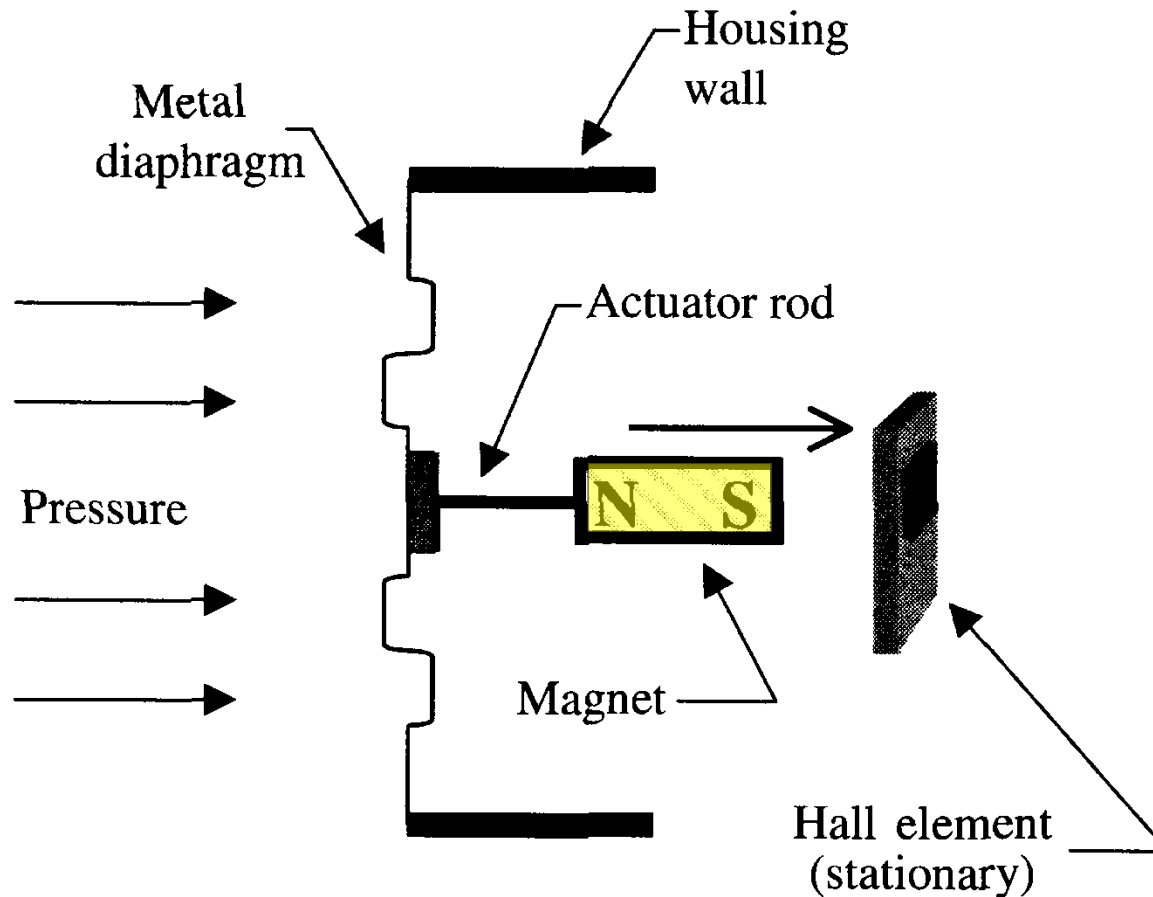
hladinový
spínač



rozepnuto



Hallův senzor – aplikace pro měření tlaku



B) Senzory s magnetoodporovým jevem



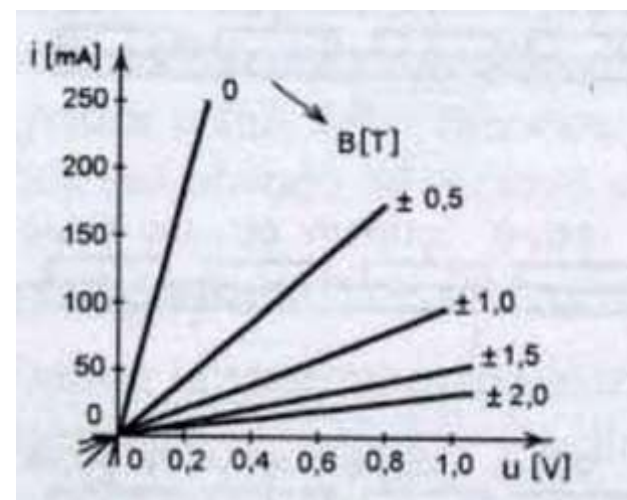
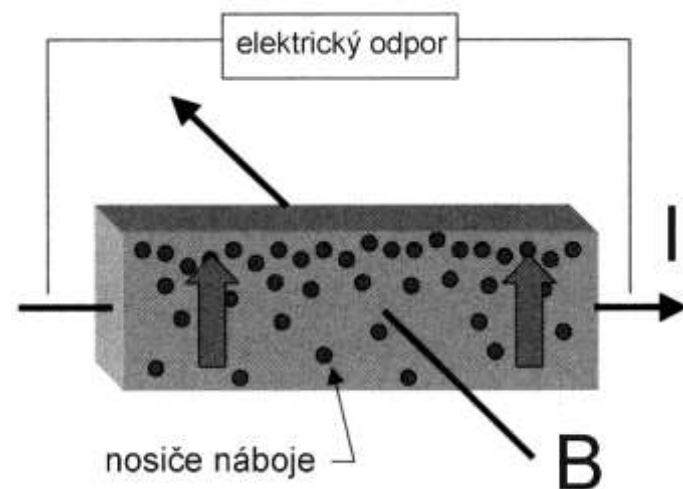
Magnetoodporový senzor – princip činnosti

Zkouška

Fyzikální princip

- ❑ Tenká magnetická vrstva
- ❑ Elektricky vodivé magnetické materiály představují tzv. anizotropní "**magnetoodporový jev**".
- ❑ V těchto materiálech vektor magnetizace vytváří směr, ve kterém teče proud.
- ❑ Působením vnějšího magnetického pole dochází ke stáčení magnetizačního vektoru ve vrstvě a tímto i "proudové cesty", což ve výsledku představuje změnu odporu vrstvy.
- ❑ Lorentzova síly uvnitř polovodiče „zužuje“ proudovou cestu a tím zvyšuje R magnetoodporu.

? Senzory magnetického pole s magnetoodporovým principem:
Nakreslete a vysvětlete princip činnosti magnetoodporového senzoru.
Nakreslete jednoduché zapojení magnetoodporového senzoru do elektronického obvodu pro vyhodnocování magnetické indukce B .



Materiály

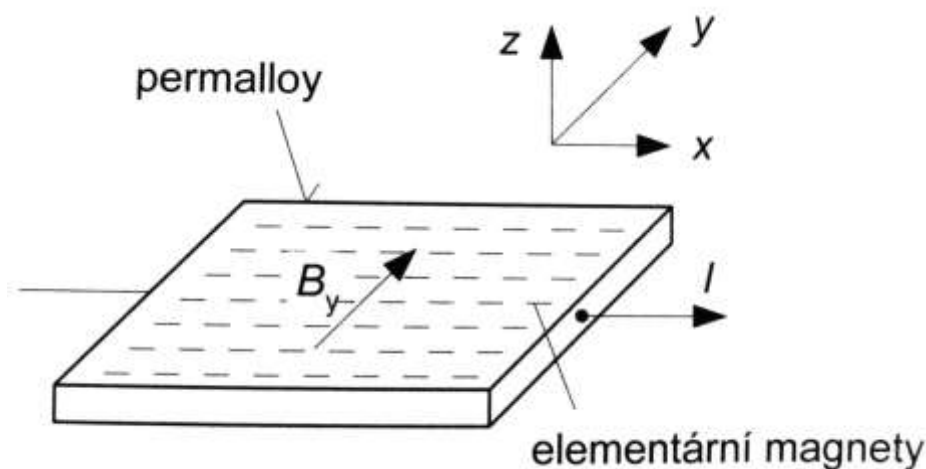
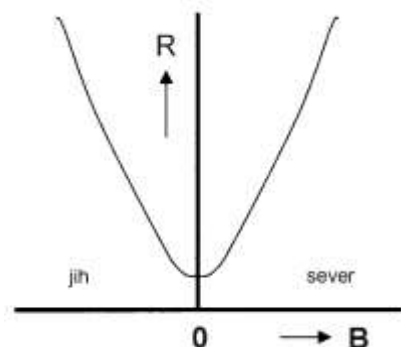
Polovodičová destička **InSb** nebo **permalloy**

↑ **Polovodič** - Při přítomnosti B se **zvyšuje** elektrický odpor materiálu

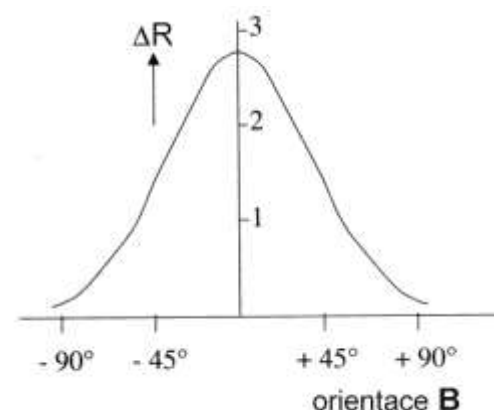
↓ **Permalloy** - Při přítomnosti B se **snižuje** elektrický odpor materiálu

Směrová citlivost

Polovodič



Kov

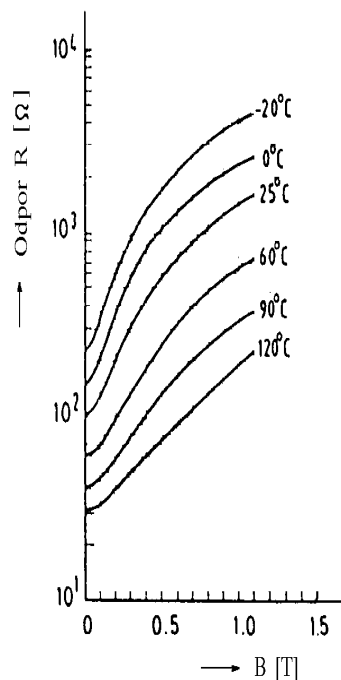


? Senzory magnetického pole s magnetoodporovým principem: Nakreslete převodní charakteristiky $R=f(B)$ pro kovový a polovodičový typ senzoru.

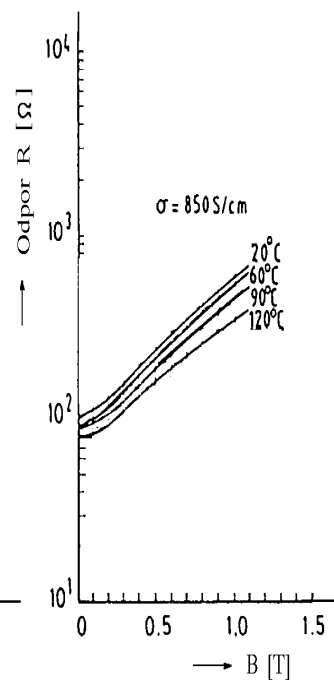
Magnetoodporový senzor – materiály

- ❑ Odpor polovodiče je funkcí vnějšího magnetického pole.
- ❑ **Kov** - např. 81% Ni a 19% Fe
- ❑ **Si** není příliš vhodný - malá pohyblivost elektronů - $1600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
- ❑ **Si s přísadou NiSb nebo InSb** - pohyblivost $7000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
- ❑ Výstup je **teplotně závislý** - nutná teplotní stabilizace.

Teplotně
nestabilizovaný
obvod



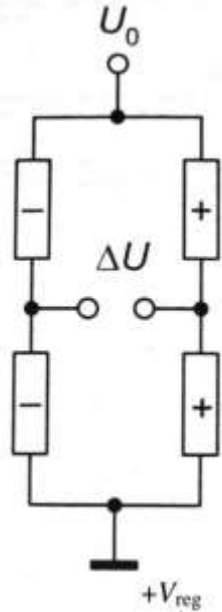
Teplotně
stabilizovaný
obvod



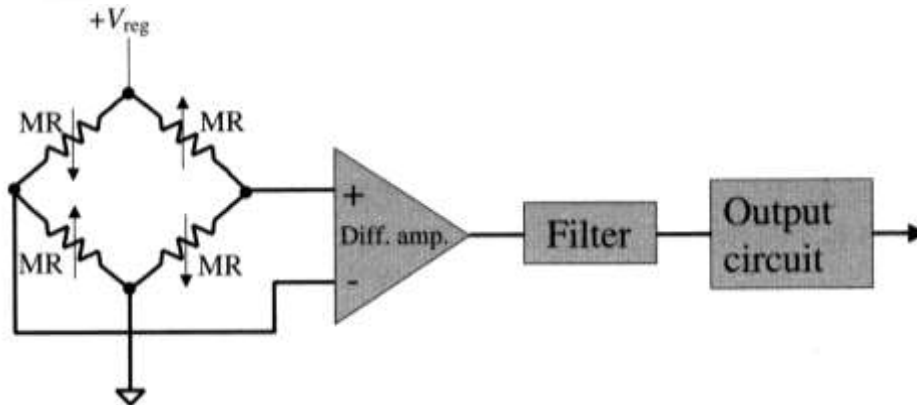
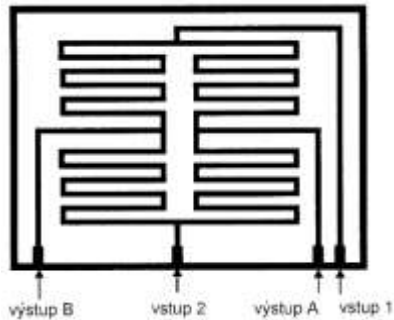
Magnetoodporový senzor – aplikace pro KMZ 10B

Parametry KMZ 10B - permalloy

Vyhodnocování signálu - můstek

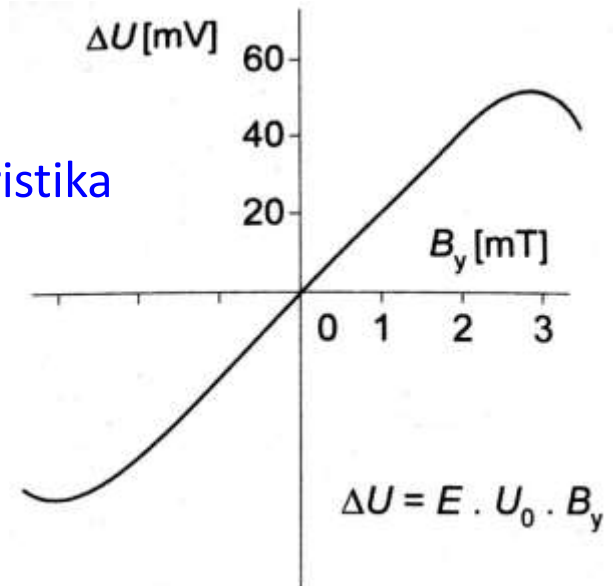


Vnitřní zapojení
KMZ 10B do můstku



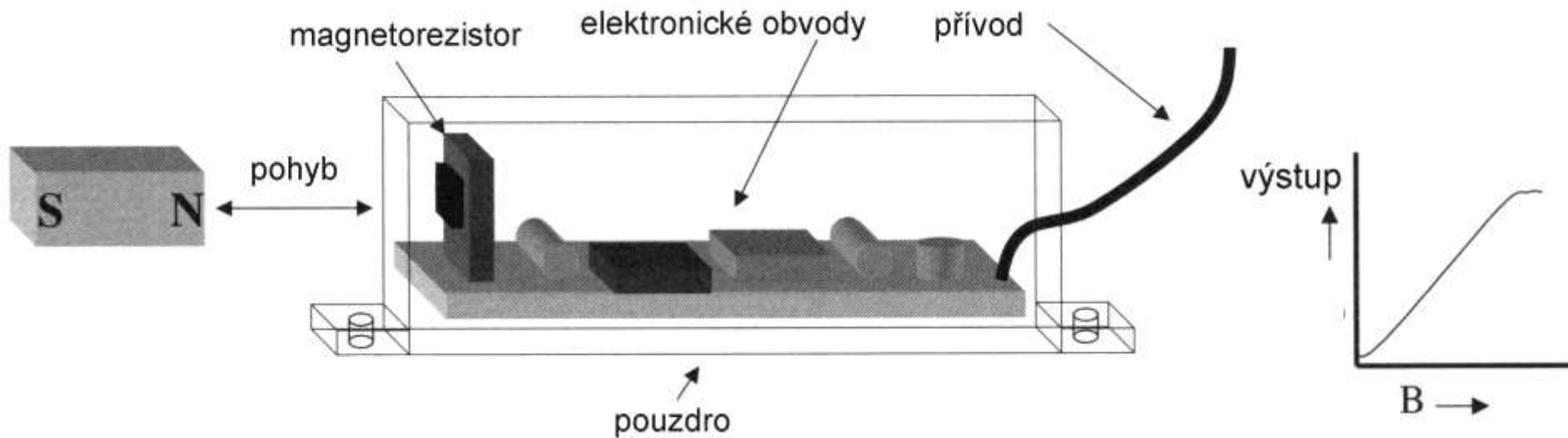
Typové označení	KMZ10B
Odpor pásku R_0	1700 Ω
Citlivost E	4,0 1/T
Teplotní koeficient	+0,3 %/K
Maximální indukce	$\pm 3,75 \cdot 10^{-3}$ T
Materiál	permalloy

Převodní
charakteristika
KMZ 10B

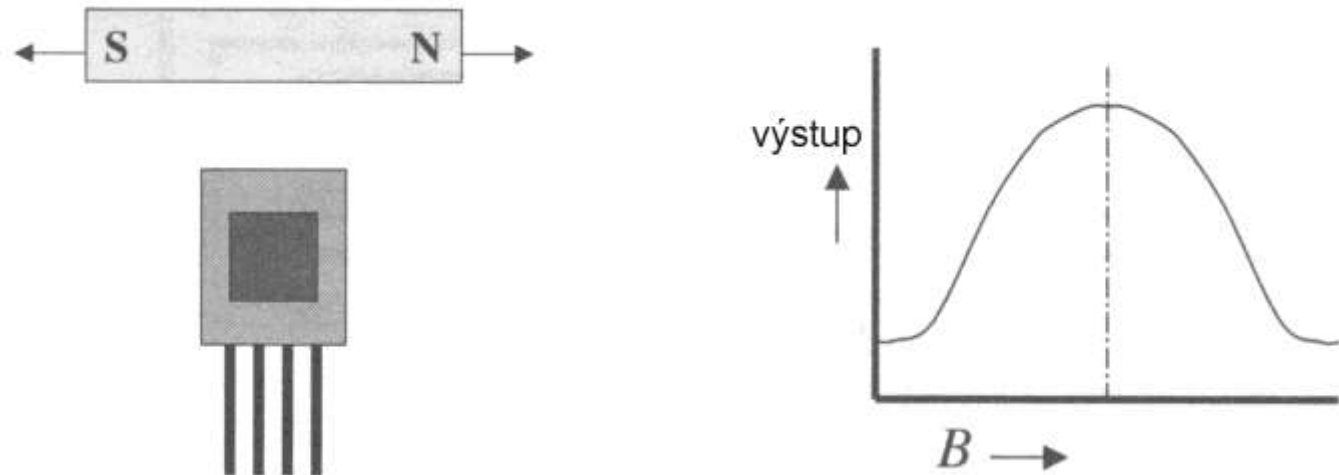


Magnetoodporový senzor – aplikace

Měření posunutí

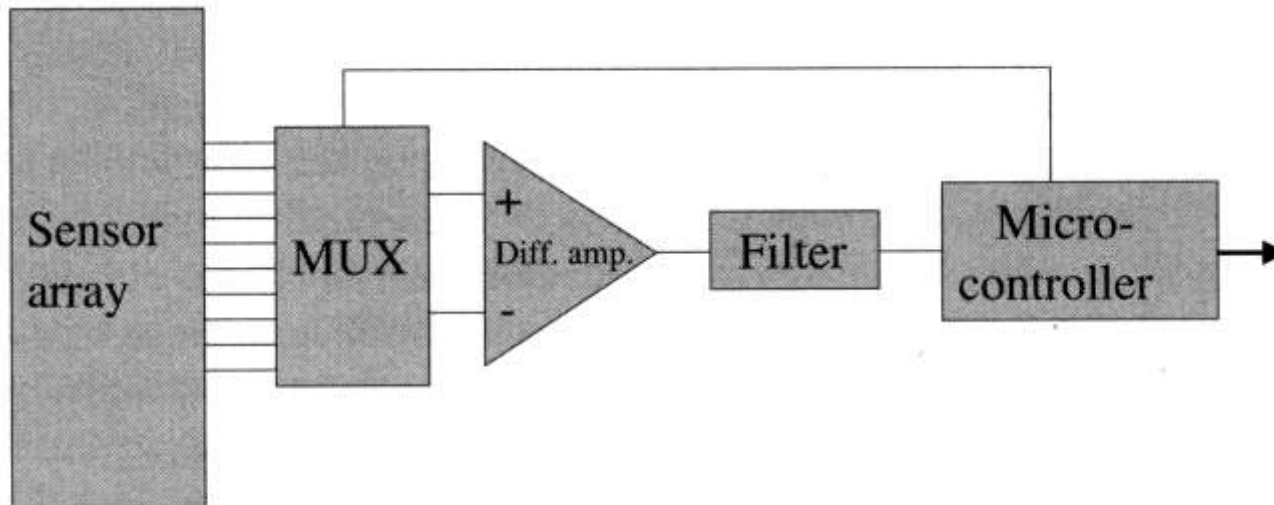
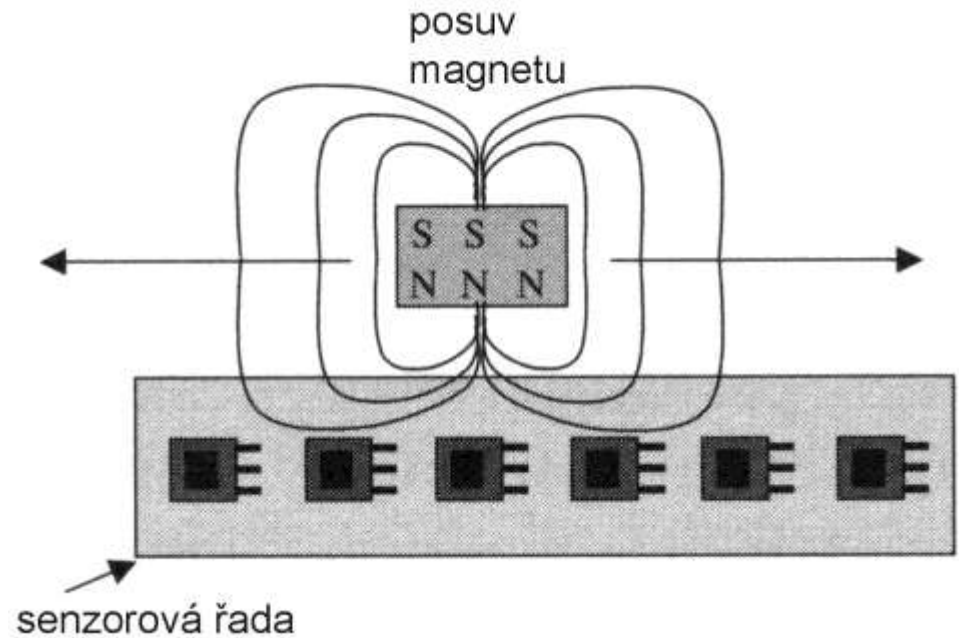


Měření velkého posunutí



Magnetoodporový senzor – aplikace

Měření velkého posunutí –
senzorová řada



C) Magnetodiody



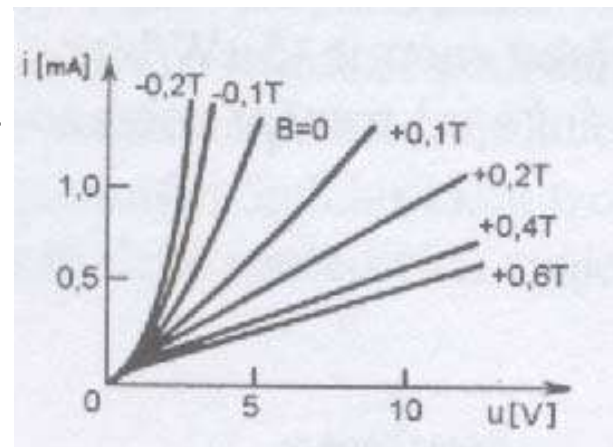
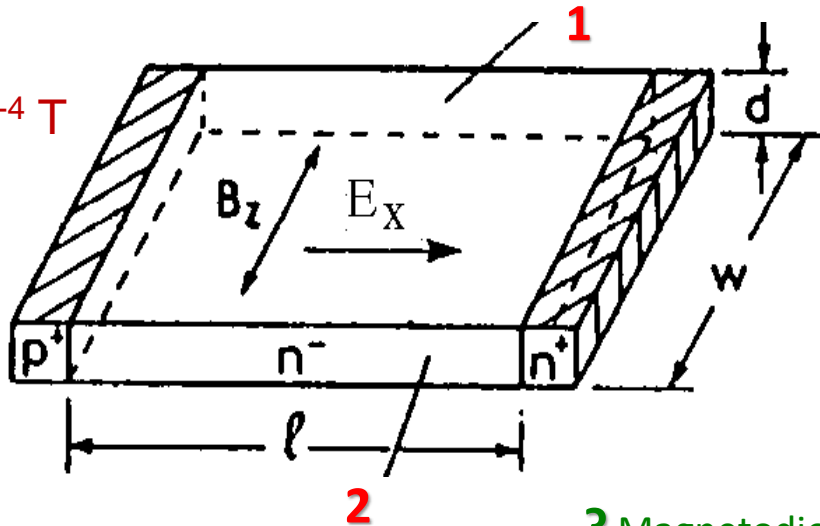
Nosiče jsou injektovány do polovodivé oblasti o rozměrech (l, w, d) z $n+$ a $p+$ oblasti působením elektrického pole.

Princip magnetodiodového jevu - mezi dvěma konci existuje rozdíl rekombinací, objevuje se dvojí injekce nosičů.

Nosiče jsou odchylovány působením Lorentzovy síly směrem k okrajům označeným **1 a 2**, což vede k vytvoření gradientu koncentrace nosičů kolmého k elektrickému poli E_x , následně k modulaci VA charakteristik diody.

Modulace VA charakteristik diody - závislá na poměrech **rekombinací**, **geometrii** a **proudovém zatížení**.

Měření mag. polí 10^{-4} T



? Magnetodiody: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti zjednodušené struktury magnetodiody

Magnetodiody

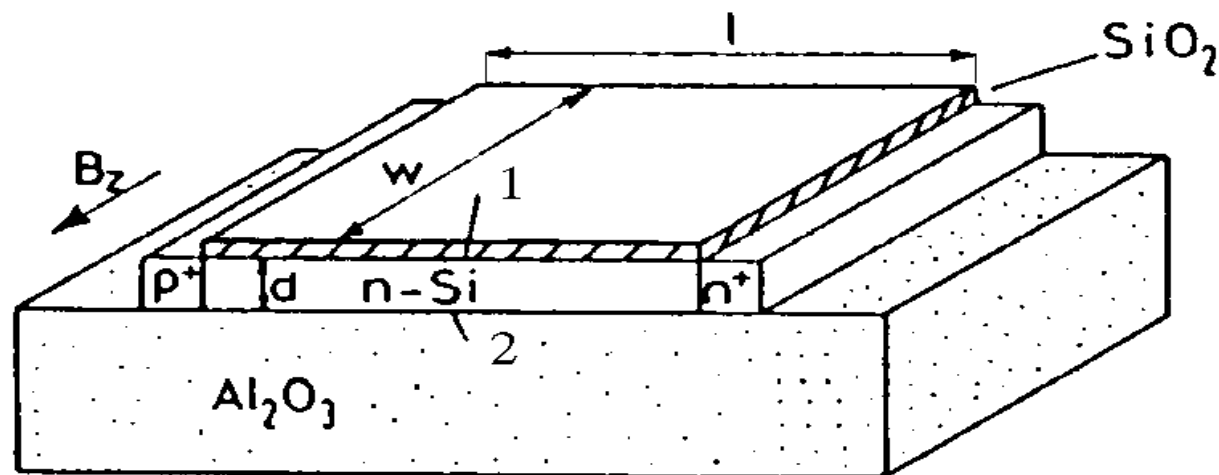
SOS

Diference povrchových rekombinací může být vytvořena v **integrované magnetodiodě** použitím **Si-Al₂O₃** (vyšší úroveň) a **Si-SiO₂** (nižší úroveň).

Struktura bývá **označována jako SOS** (Sapphire-On-Silicon)

Citlivost je **$S=5$ V/T**.

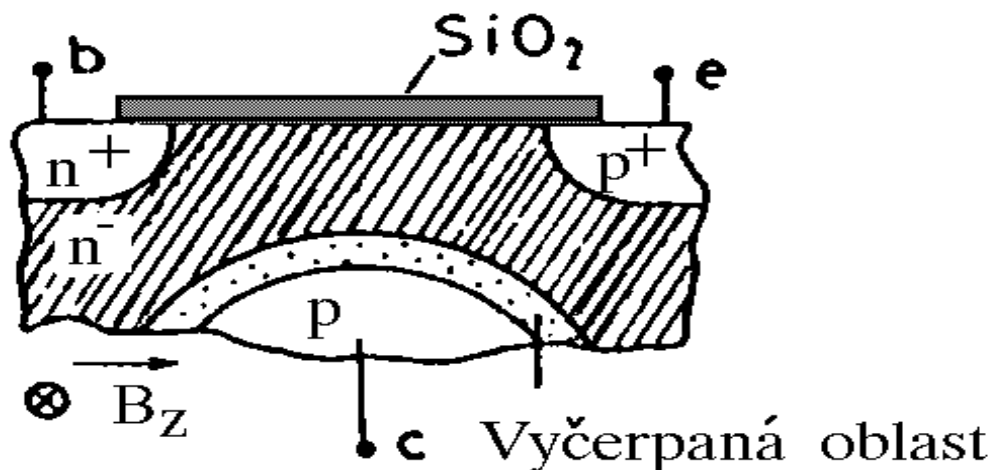
☹ **Nevýhody** - obtížná realizace rekombinace na povrchu Si-Al₂O₃, citlivost je silně nelineární, velká teplotní závislost.



Magnetodiody

CMOS technologie

- Technologie kompatibilní s CMOS technologií
- Struktura podobná bipolárnímu tranzistoru, ale s opačnou polarizací p-n přechodu.
- **B** působící kolmo na bázevý proud odchyluje proudové siločáry směrem ke kolektoru nebo od kolektoru.
- Při modulaci kolektorového proudu se mění odpor báze a tímto je modulované napětí na přechodu báze - emitor.
- Citlivost je větší než u SOS magnetodiod, $S=25 \text{ V/T}$.



D) Magnetotranzistor



Magnetotranzistor

Magnetotranzistor (magnistor) se skládá z "proudového zdroje", tj. emitoru a několika kolektorů.

2 principy činnosti:

- a) **Nosiče náboje** jsou magnetickým polem odchylovány Lorentzovou silou - způsobuje vznik nerovnováhy u kolektorových proudů.
- b) **Modulace emitorové** injekce jako u magnetodiod (Hallovo napětí v bázi moduluje pomocí emitoru proudovou injekci).

Rozdělení podle směru hlavního toku proudu vůči Si povrchu:

- a) **Laterální** směr proudu - citlivost na kolmé magnetické pole
- b) **Vertikální** směr proudu - citlivost na laterální magnetické pole

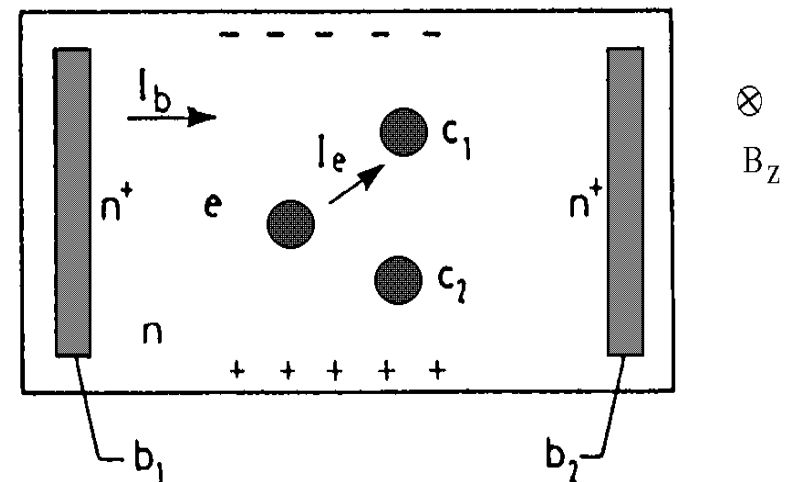


Magnetotranzistor - laterální

Laterální magnetotranzistor

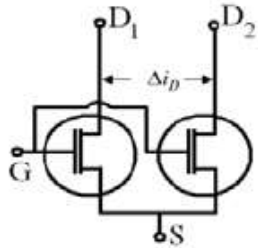
- Emitorový proud I_e se odchyluje působením magnetického pole - na $p+$ typech kolektorů $C1$ a $C2$ vzniká proudový rozdíl.
- Přiložením kladného napětí mezi báze kontakty $b1$ a $b2$ způsobí chování podobné Hallovo jevu a tímto vzniká Hallovo napětí.
- Vzniklé Hallovo napětí pomáhá odchylovat proudové siločáry a tím dále zvyšuje proudové rozdíly na kolektorech.
- Kombinací těchto dvou jevů vzniká výsledný rozdíl proudů
- Laterální magnetotranzistory mohou být realizovány jako **bipolární** nebo **CMOS**
- Rozlišitelnost do 10^{-7} T

? Magnetotranzistor: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu bipolárního laterálního magnetotranzistoru, vysvětlete stručně činnost a význam jednotlivých veličin v nákresu.

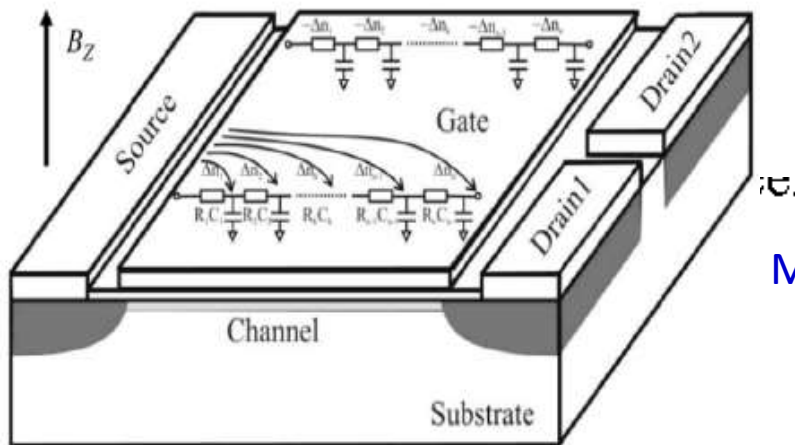
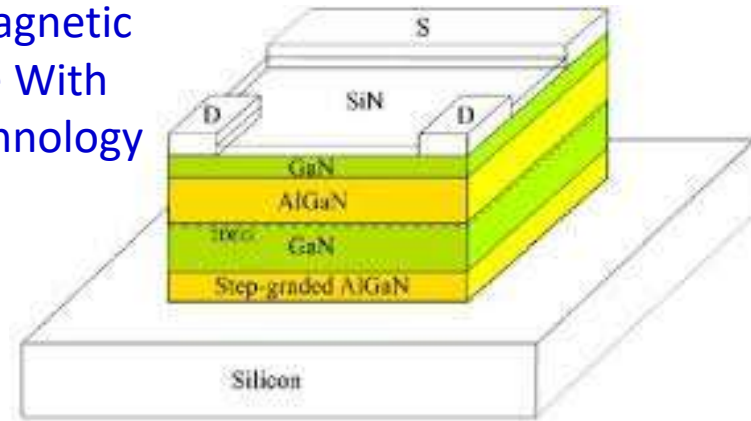


Laterální magnetotranzistor bipolární

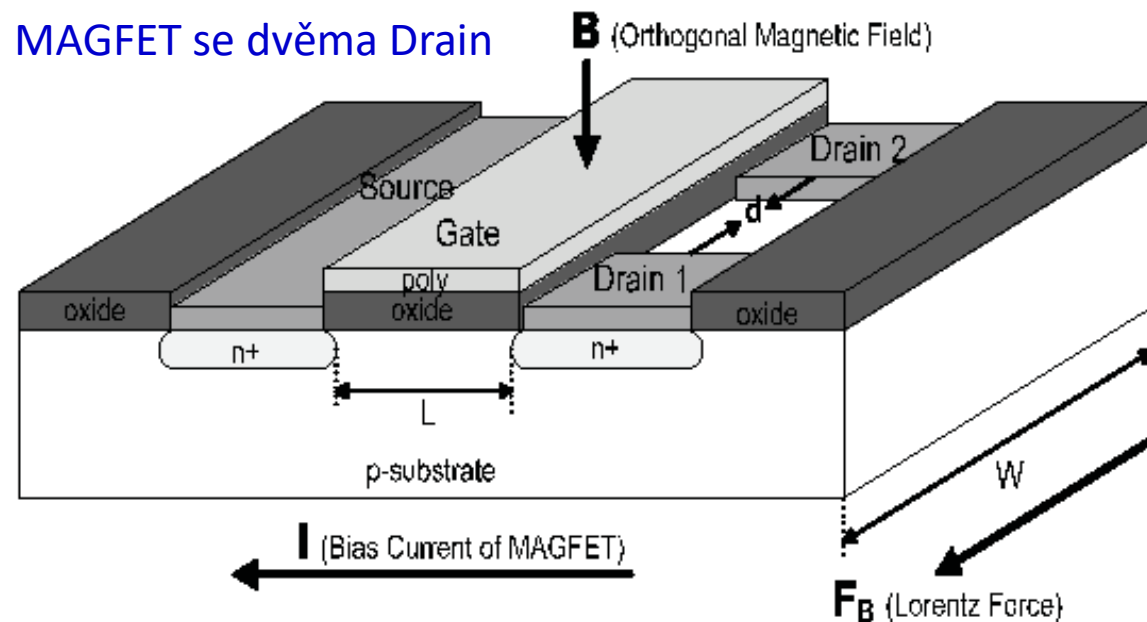
Magnetotranzistor – laterální unipolární (MAGFET)



Dual-Drain GaN Magnetic Sensor Compatible With GaN RF Power Technology



MAGFET se dvěma Drain



2. Physical structure of n-channel MAGFET



Magnetotranzistor – vertikální

Vertikální struktura magnetotranzistorů

Proud je kolmý na Si povrch a B má laterální směr vůči povrchu Si.

2 základní typy struktury:

a) Diferenciálně zesilující magnetický senzor - DAMS

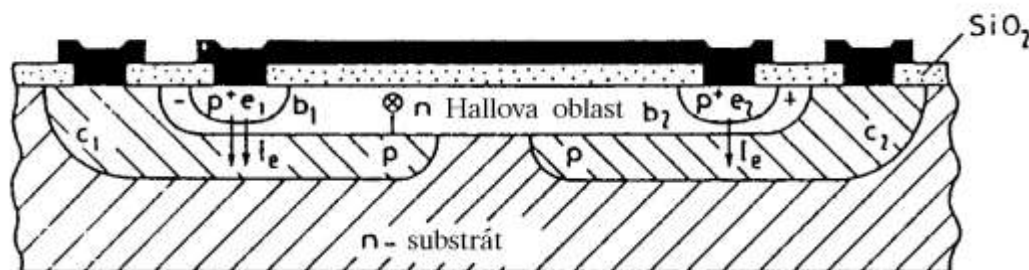
DAMS struktura je složena ze dvou vertikálních pnp tranzistorů se společnou bázovou oblastí. Kolmé B vytváří Hallovo napětí mezi emitorovými plochami, toto napětí modifikuje injektované proudy a tímto i kolektorové proudy. Výhoda této struktury spočívá v přímém zesilování malé úrovně Hallova signálu.

b) Magnetotranzistor s dvojitým kolektorem.

Proud teče opět kolmo na povrch Si, senzor je citlivý na laterální B . Struktura je složena ze dvou pnp tranzistorů, ale na rozdíl od předchozí struktury jsou báze a emitor společné k oběma tranzistorům. Laterální B odchyluje elektrony směrem k jednomu n^+ kolektoru a tímto vzniká proudový rozdíl na kolektorech

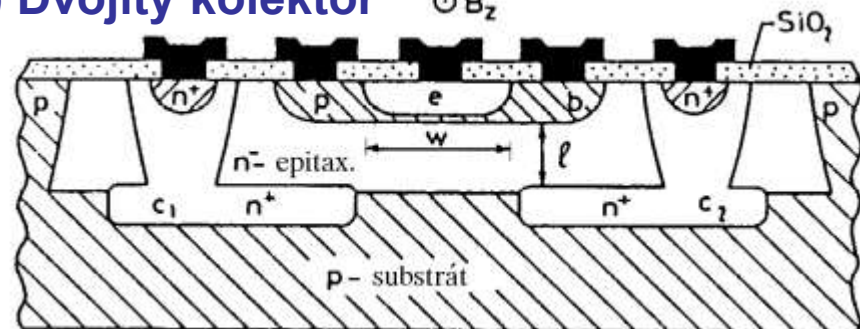
a) DAMS

$\odot B_z$



b) Dvojitý kolektor

$\odot B_z$

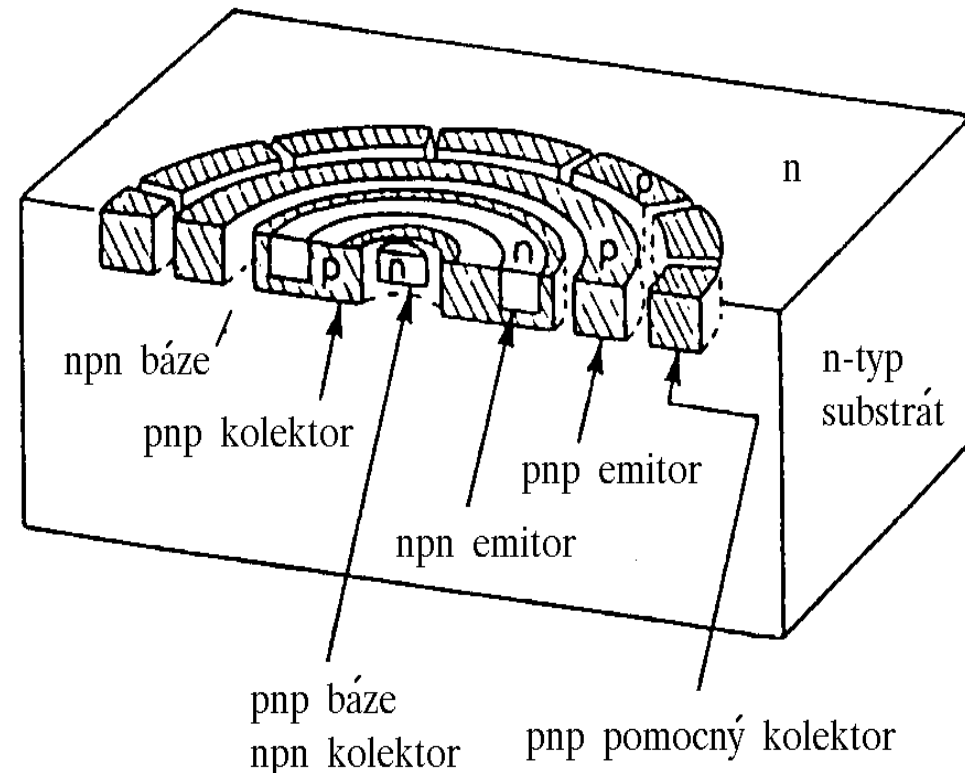


E) Nosičově doménové mikrosenzory magnetického pole



Nosičově doménové mikrosenzory magnetického pole

- Mnohonásobná **struktura pnpn**.
- **Centrální část** - kruhové vertikální pnp a laterální npn tranzistory.
- **Kolektory p-typu**, které obtáčejí střed působí jako přídavné kolektory laterálních npn tranzistorů a detekují rotaci proudové domény.
- **Proud působí v malé doméně**, která rotuje při přítomnosti magnetického pole. Činnost tranzistoru je podmíněna prahovým magnetickým polem
- Výstup je silně **teplotně závislý**.
- Struktura má velkou proudovou citlivost **3 mA/T** .



F) SQUID

Senzory slabého magnetického pole



Senzor magnetického pole - SQUID

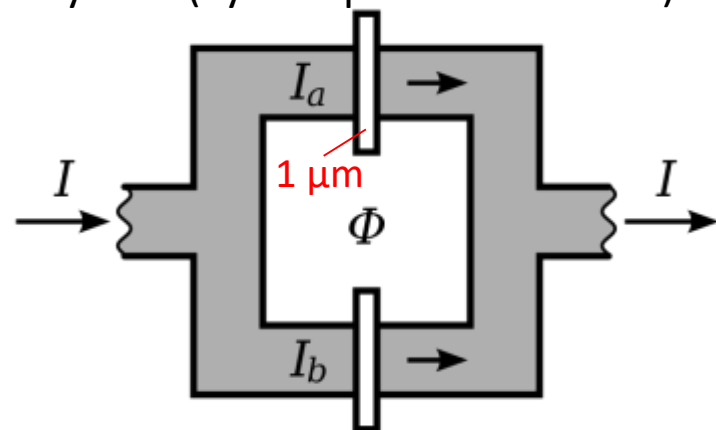
Zkouška

Princip

- **SQUID** (supravodivé kvantové interferenční zařízení) pro měření velmi malých magnet. polí.
- Základem SQUID je smyčka se dvěma Josephsonovými přechody
- Celkový stejnosměrný proud $I = I_a + I_b$ je součet proudů v obou větvích, při sčítání vzniká interference
- **Fázový rozdíl** je I_a a I_b přímo úměrný Φ , který prochází smyčkou (vysoká přesnost měření)

Josephsonův jev (džouzejsnův)

je vznik elektrického proudu mezi **dvěma supravodiči** oddělenými vrstvou **izolantu** tenčí než μm . Jedná se o speciální případ **kvantového tunelového jevu**, kdy částice procházejí zdánlivě neprostupnou bariérou..



SQUID (Superconducting Quantum Interference Devices)

- Je využíváno k měření **velmi malých magnetických polí** až na hranici řádu $5 \times 10^{-18} \text{ T}$ (magnetické pole Země je $10^9 \times$ silnější).
- Hlavní složka zařízení použít **niob** ochlazený pomocí **tekutého hélia** (nejpřesnější ale drahé).
- Vysokoteplotní slitiny, např. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ s chlazením **tekutým N_2** (menší přesnost, lacinější),

Poznámka: Tepelná vodivost tekutého hélia je $3 \cdot 10^6 \times$ větší než u Cu při 25°C

? SQUID: Nakreslete zjednodušeně a vysvětlete princip činnosti struktury SQUID. Jaké nejmenší magnetické pole může tato struktura měřit. Jaké plyny se používají k dosažení kryogenních teplot.

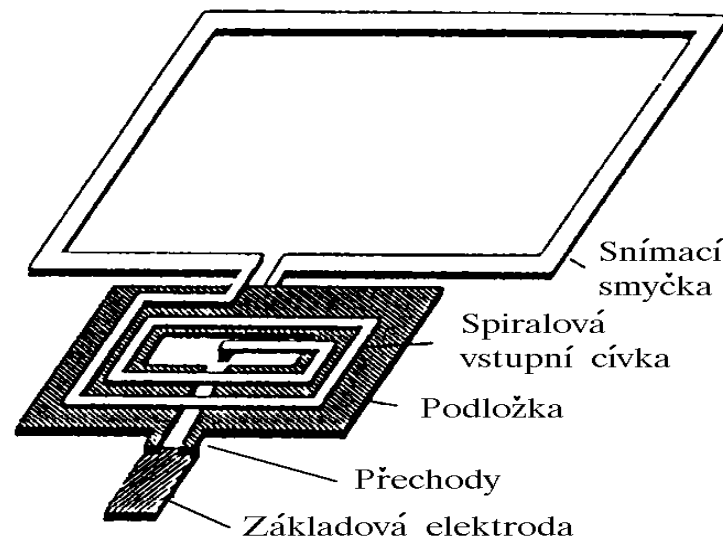
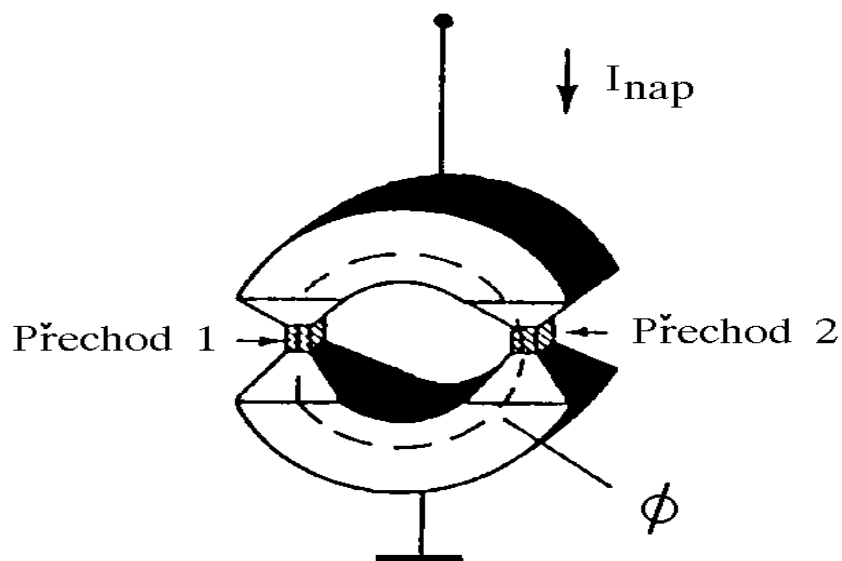


Senzor magnetického pole - SQUID

Supravodivé kvantové - kruhová struktura vyrobená ze supravodivého materiálu ($\text{YBa}_2\text{CuO}_{7-x}$) přerušeno Josephsonovými přechody

Integrace - tenkovrstvový "SQUID čtverec", působí jako zemnicí destička pro vstupní cívku pro zlepšení induktivní vrstvy mezi spirálovou vstupní cívkou a "SQUID čtvercem".

Citlivost je v praxi omezena bílým a $1/f$ šumem.



[John Clarke](#), [Alex I. Braginski](#). The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems v. 1 (Physics) Hardcover 2004



Senzor magnetického pole - SQUID

Aplikace

- **Lékařství:** Měření mozkových signálů, které vyvolávají magnetická pole v řádech 10^{-13} T.
 - Magnetoencefalografie (MEG) - měří neurální aktivitu mozku
 - magnetokardiografie (MCG) – měří aktivitu srdečního svalu
- **Geologie:** Průzkum ložisek materiálu



Výšetření srdce snímkováním magnetického pole s využitím technologie **SQUID** (většinu objemu zařízení tvoří kryogenika)

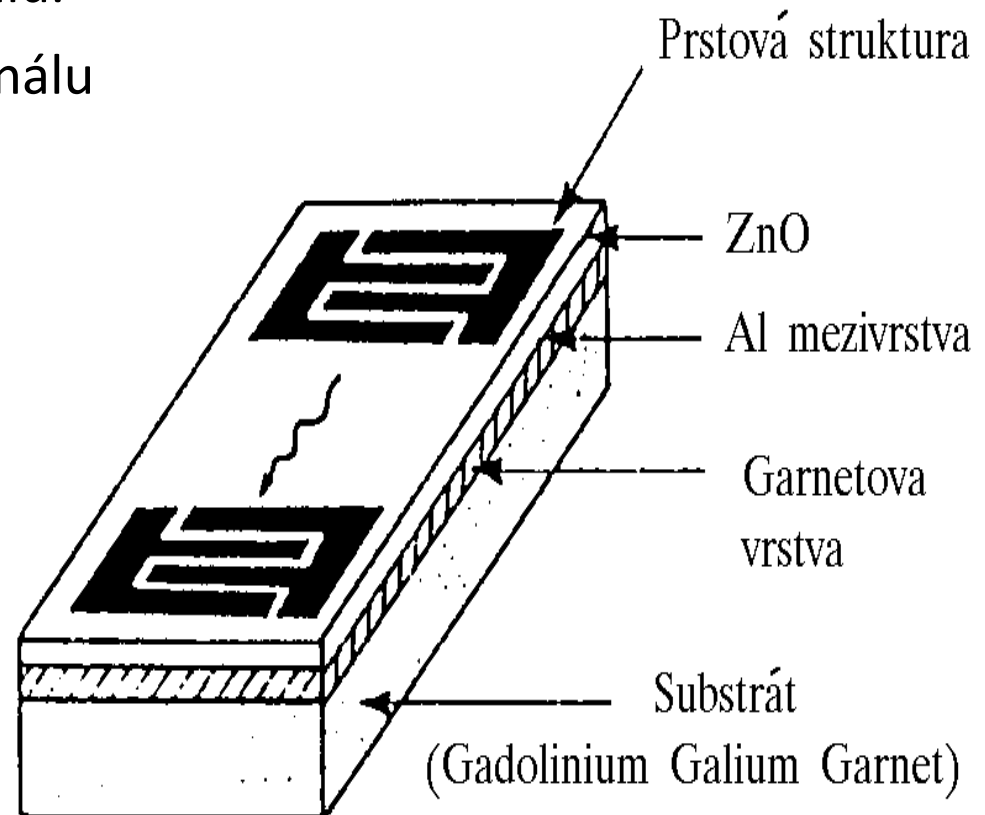
G) SAW mikrosenzory magnetického pole



Princip:

- Působením **B** na tenkou magnetickou vrstvu, kterou se šíří povrchově akustická vlna, dochází k modulaci akustických parametrů magnetoelastických materiálů.
- Digitální tvar výstupního signálu

? SAW mikrosenzor magnetického pole:
Nakreslete zjednodušeně a vysvětlete
základní princip činnosti senzoru.
Popište způsob vyhodnocování
výstupního signálu



Mikrosenzory magnetického pole - porovnání

Typ mikrosenzoru	Rozsah [T]	Citlivost	Poznámka
Hallova sonda (komerční)	$10^{-3} - 10^{-9}$ 0 - 1	5 - 10 %/T 200 V/T	Si citlivější než InSb, linearita KSY10 Siemens, lin. $\pm 0,7$ %
Magnetoodpor (komerční)	$10^{-1} - 10^{-10}$ 0 - 1	500 %/T 700 %/T	Citlivější, menší linearita F830L100E Siemens, nelin., tepl. záv.
Magnetodiody	$\approx 10^{-3}$	5 V/T 25 V/T	SOS CMOS
Magnetotranzistory	$\approx 10^{-3}$	0,5 - 2 %/T 7 %/T 2- 5 %/T	Laterální driftový pnp, tepl. záv. Laterální injekční pnp, tepl. záv. Vertikální nnp, tepl. záv.
Nosičově - doménové	-	100 kHz/T	Laterální kruhový nnp, vývoj
SQUID	$10^{-6} - 10^{-14}$	φ_0	Extrémní citlivost, potřebuje supervodivou teplotu



Otázky

1. Senzor magnetického pole s Halovým jevem: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti Hallova senzoru, Napište základní rovnici pro výpočet Hallova napětí
2. Měření vzdálenosti a posuvy s Halovým senzorem: Nakreslete a vysvětlete princip měření vzdálenosti a posuvu
3. Měření vzdálenosti s Hallovým senzorem v režimu s feromagnetikem: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti Hallova senzoru v režimu využití feromagnetika pro měření vzdálenosti
4. Vyhodnocování signálu z Hallova senzoru: Nakreslete zjednodušeně princip zapojení senzoru pro vyhodnocování signálu (vyhodnocovací obvod) a vysvětlete jeho činnost
5. Sensory magnetického pole s magnetoodporovým principem: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti magnetoodporového senzoru. Nakreslete jednoduché zapojení magnetoodporového senzoru do elektronického obvodu pro vyhodnocování magnetické indukce B
6. Sensory magnetického pole s magnetoodporovým principem: Nakreslete převodní charakteristiky $R=f(B)$ pro kovový a polovodičový typ senzoru
7. Magnetodiody: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti zjednodušené struktury magnetodiody
8. Magnetotranzistor: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu bipolárního laterálního magnetotranzistoru, vysvětlete stručně činnost a význam jednotlivých veličin v nákresu
9. SQUID: Nakreslete zjednodušeně a vysvětlete princip činnosti struktury SQUID. Jaké nejmenší magnetické pole může tato struktura měřit. Jaké plyny se používají k dosažení kryogenních teplot
10. SAW mikrosenzor magnetického pole: Nakreslete zjednodušeně a vysvětlete základní princip činnosti senzoru. Popište způsob vyhodnocování výstupního signálu

