

9. SNÍMANIE MECHANICKÝCH VELIČÍN

- ♦ rýchlosť (priamočiara)
- ♦ otáčky
- ♦ sila
- ♦ moment
- ♦ zrýchlenie

9.1. Priamočiara rýchlosť

- snímanie problematické (pre väčšie rozsahy pohybov):
 - ♦ prevod na rotačný pohyb (otáčky)
 - ♦ derivácia polohy (ak sa sníma) podľa času $v = dx/dt$

9.2. Snímanie otáčok

- spojité:
 - tachodynamo (klasické, unipolárne)
 - tachogenerátor (klasický, Feraris)
- impulzné:
 - magnetické:
 - s indukovaným napätím
 - s Hallovou sondou
 - optické:
 - s reflexnými značkami (vyššie otáčky)
 - s optickými mriežkami (nízke otáčky)

9.2.1. Tachodynamo, tachogenerátor

Tachodynamo

- má pevný stator, tvorený permanentnými magnetmi a vinutý rotor s komutátorom
- na komutátor dosadajú zberné kontakty
- výstup je jednosmerné napätie:
 - amplitúda lineárne závislá od otáčok
 - polarita závislá od smeru

výhody :

- jednoduché
- citlivé
- lineárne a pomerne presné

nevýhody :

- zvlnenie výst. napätia, šumy

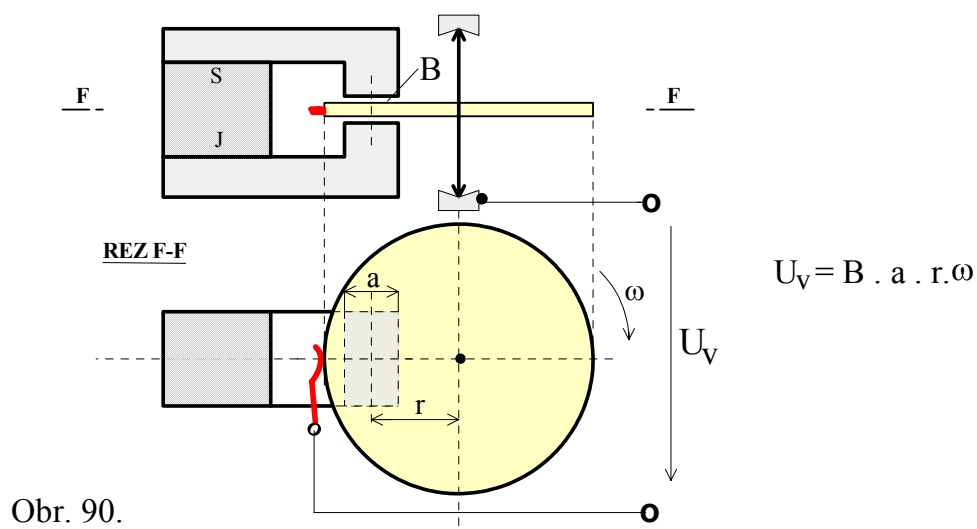
- výstup sa nedá zaťažiť
- nevhodné pre vysoké otáčky (odhadzovanie "kefiek")

Príklad : tachodynamo MEZ typ K5A1

- $n = 0 \div 6000$ ot/min , citl. 20 V na 1000 ot/min
- linearita 1 % , zvlnenie 0,5 %
- mech. príkon 0,33 W na 1000 ot/min
- trecí moment kľudový 200 mNcm
- záťažný odpor $> 5000 \Omega$ na volt výst. napätia

Unipolárne dynamo

- indukovanie napätia v otáčajúcom sa el. vodivom kotúči v magnetickom poli
- výst. napätie sa odoberá len jedným klzným kontaktom
- lineárna charakteristika
- menšie komutačné poruchy
- malá zotrvačnosť pohyblivých častí
- malé výstupné napätie

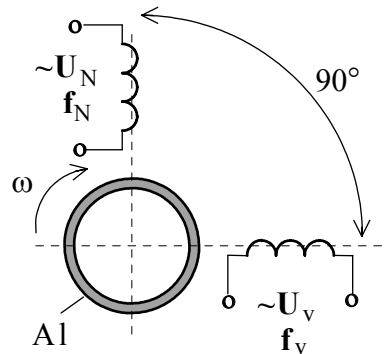


Tachogenerátor

- princíp podobný tachodynamu, výstup je cez nedelené zberné krúžky
- výstupné napätie je striedavé:
 - ako signál môžeme využiť jeho amplitúdu
 - alebo frekvenciu.

V reálnych konštrukciách býva stator vinutý, točí sa rotor (magnety), čím odpadnú zberné krúžky. Zátťaž výstupu býva $10^{-3} \div 1 \text{ W}$.

Tachogenerátor s budením (systém Ferraris). Princíp je na obr. 91.



Obr.91.

- dve vinutia, priestorovo posunuté (pre otočný systém o 90°).
- jedno je napájané \sim napätím, z druhého je odoberaný výst. signál.
- vo vzduchovej medzere sa otáča elektr. dobre vodivý bubienok - dutý valec.
- vírivé prúdy natáčajú smer magnetického toku tak, že časť viaže výst. cievka.

Výstup je \sim napätie s frekvenciou rovnakou ako U_N a amplitúdou, úmernou otáčkam :

$$U_{\text{výst}} = k U_N n$$

Poznámka: Fáza výstupu sa mení o 180° pri zmene zmyslu ω .

Snímač uhlového zrýchlenia ε

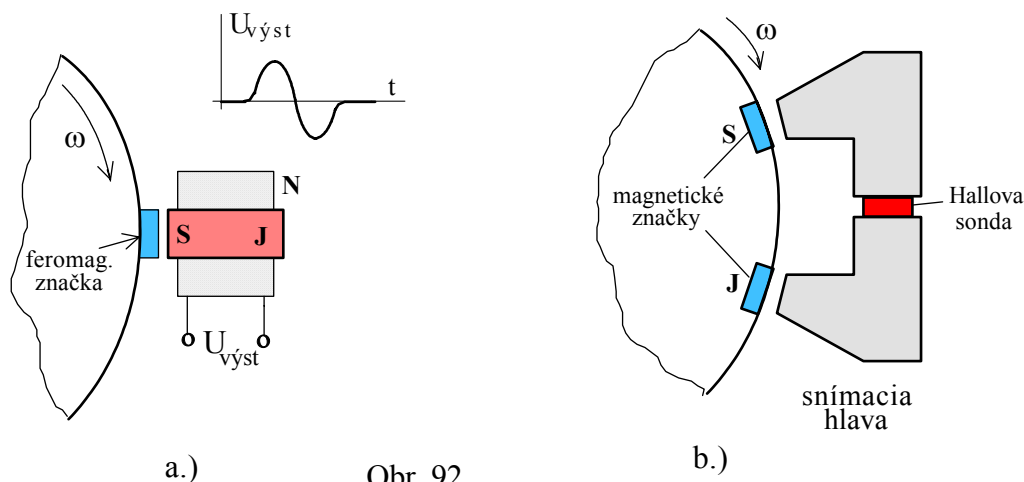
- jedno vinutie napájame jednosmerným napätím
- signál z druhého vinutia má charakter jednosmerného napätia
- amplitúda je úmerná veľkosti ε , polarita zmyslu ε
- pre $\omega = 0$ a $\omega = \text{konš.}$ je výst. napätie nulové

Poznámka: Pozor, systém predstavuje tlmiaci člen - brzdu, ktorá môže značne zaťažiť meranú sústavu, najmä pri slabších výkonoch (momentoch).

9.2.2. Magnetické impulzné snímanie otáčok

- indukovanie napätia od zmeny mag. toku
- Hallov jav

Princíp indukčného systému je na obr.92a.



Obr. 92.

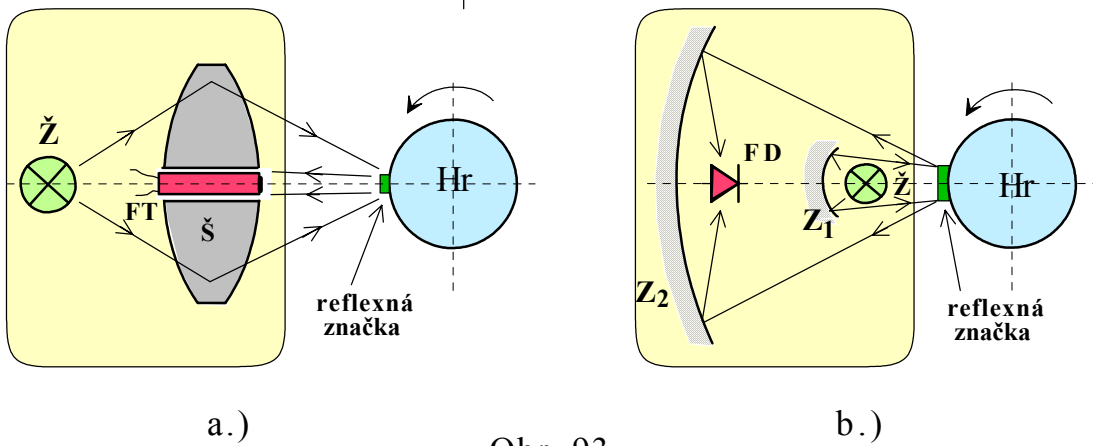
- výstupný signál má dve polarity (približovanie a vzdďal'ovanie sa značky)
- amplitúda závisí od obvodovej rýchlosti
- značka je z magneticky mäkkého materiálu
- značka môže byť i permanentný magnet, zvyšok je potom z mag. mäkkého materiálu
- systém je vhodný pre vyššie otáčky

Systém s **Hallovým javom** je na obr. 92b.

- značky môžu byť nahrané priamo na hriadeľ
- nahrávacía hlava je podobná snímačej, len s cievkou namiesto Hall. sondy
- systém je vhodný i pre pomalé otáčky

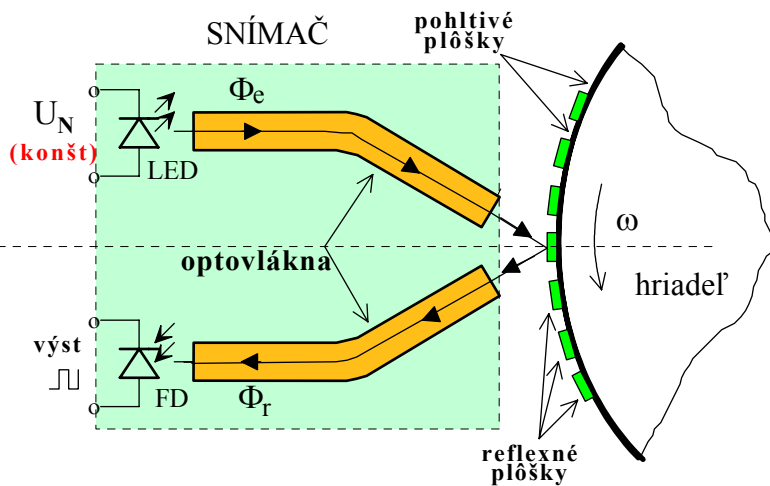
9.2.3. Optické impulzné snímanie otáčok

- presnejšie snímanie (nízke otáčky) → opísané optické mriežky
- nižšie nároky, resp. vyššie otáčky → jednoduchšie systémy, obvykle reflexné, obr. 93.



Obr. 93.

System s optovláknami je naznačený na obr. 94.



Obr. 94.

- zdroj svetla je LED (**konš. budenie - kvôli možnej interferencii**)
- emitovaný tok Φ_e je optovláknom vedený k hriadeľu
- na hriadeľi sa striedajú reflexné a pohltivé plôšky
- na obr. je poloha pri max. odraze svetla
- odrazený tok Φ_r je vedený optovláknom k fotodetektoru FD
- výst. signál → približne obdĺžnikový priebeh
- frekvencia je úmerná ω a počtu odrazných plôšok na obvode

Výhody:

- systém je vhodný aj pre zle prístupné miesta
- optovlákná môžu byť pomerne dlhé, ohnuté a v tenkom zväzku
- malá vzdialenosť od hriadeľa → malý vplyv svetla z okolia

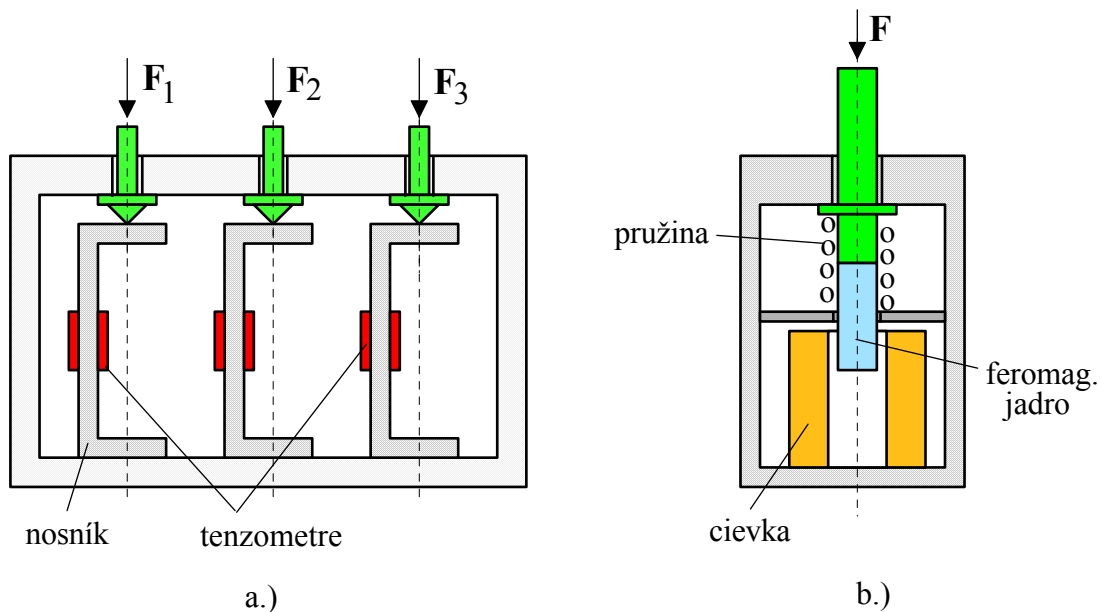
9.3. Snímanie sily

- ♦ deformačné členy + snímanie :
 - mech. napätia - tenzometre
 - zmeny polohy - malé výchylky [mm]
- ♦ piezoelektrické - nevhodné pre statické merania
- ♦ magnetoanizotropné
- ♦ zmena elektrického odporu

9.3.1. Deformačné členy

Menia pôsobiacu silu na inú veličinu

- nosníky → deformácia, tenzometre
- pružiny → zmena polohy, snímač polohy (indukčný, fotoelektrický)
- pružné podložky → zmena polohy



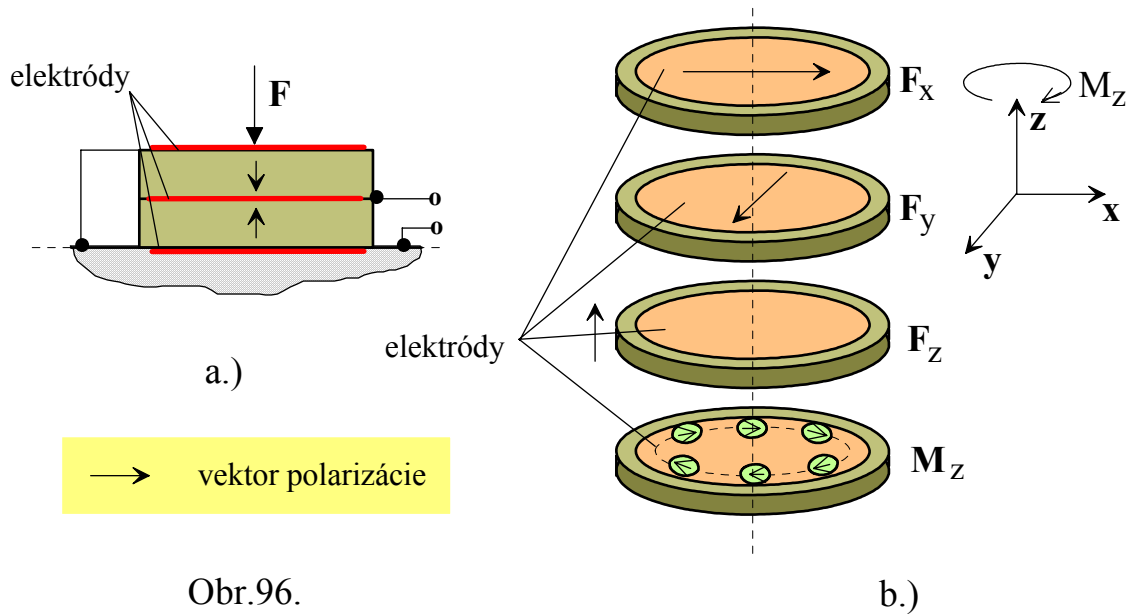
Obr. 95.

Na obr. 95a je časť maticového snímača s def. nosníkmi + tenzometre
95b je systém s pružinou a indukčným snímačom polohy

9.3.2. Piezoelektrické snímače

- ♦ využívajú vznik náboja pri pôsobení sily
- ♦ smer polarizácie - smer citlivosti
- ♦ statické merania - náboj po čase "zmizne"
- ♦ materiál - piezokeramika

Jednoduchý snímač obr.96a, na obr. 96b je viaczožkový snímač (obecná sila a moment k jednej osi)



Obr.96.

b.)

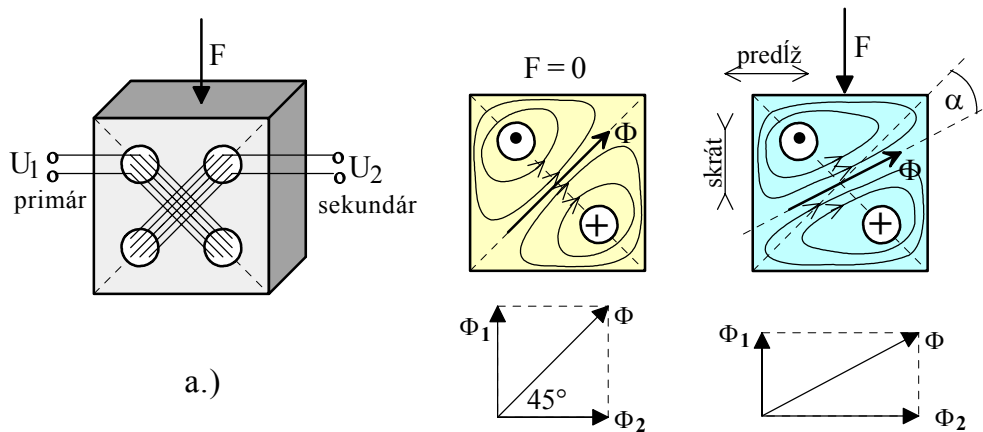
Poznámka: Ak upevníme na systém teliesko so známou hmotnosťou m , toto pri pohyboch pôsobí silou $F = m \cdot a$, dostávame snímač zrýchlenia

9.3.3. Magnetoanizotropné snímače síl

Magnetická anizotropia - v rôznych smeroch rôzne magnetické vlastnosti

Prechodne jav vzniká pri silovom namáhaní (deformácii) niektorých feromagnetík

Princíp konštrukcie a základné stavy na obr. 97.



a.)

Obr.97.

b.)

c.)

- hranol z vhodného feromagn. materiálu (permalloy)
- dve vinutia prevlečené cez otvory
- ich osi sú na seba kolmé, tvoria transformátor
- bez pôsobenia sily sekundár neviaže žiadny mag. tok, U_2 je nulové
- pri silovej deformácii nastanú tieto javy (obecne) :

ťah $\rightarrow +\sigma$ (predĺženie) $\rightarrow \mu_r$ stúpa \rightarrow mag tok Φ stúpa
 tlak $\rightarrow -\sigma$ (skrátanie) $\rightarrow \mu_r$ klesá \rightarrow mag tok Φ klesá

- v smere pôsobiacej sily je skrátanie, v smere kolmom potom predĺženie
- zložka Φ_2 stúpne, zložka Φ_1 klesne
- výslednica Φ sa odchyli od 45° a jej časť môže viazať sekundár
- napätie je charakteristické pre transformátorové snímače

Veľká výhoda je značná preťažiteľnosť snímača.

Príklad parametrov: snímač pre $F = 5000$ kN (fy ASEA Švédsko)

linearita, presnosť	0,5 %
rozsah teplôt	+20 ÷ +80 °C
hysteréza	0,2 %
stlačenie	0,05 mm
napájacia f	50, 60, 400 Hz
preťaženie	200 %

9.3.4. Zmena elektrického odporu

- vodivá guma
- plastické hmoty (polyuretán)
- Materiály vykazujú zmenu odporu pri stláčaní
- Miera stlačenia úmerná sile (niekedy pomocná pružina)

Poznámka: Materiály majú značnú časovú a teplotnú chybu

9.4. Meranie momentu (na hriadeľi)

9.4.1. Meranie deformácie

Meranie je obvykle nepriame, cez deformačný člen - hriadeľ

Vyhodnocuje sa deformácia:

- predĺženie povrchovej priamky (ε - pomerné)
- skrut hriadeľa φ

- ◆ tenzometrami
- ◆ impulzne
- ◆ magnetoanizotropne
- ◆ inými, upravenými princípmi

Pri meraní uhla skrutu sa vychádza z výrazu:

$$M_k = \frac{GI_p \varphi}{l}$$

φ - uhol skrutu (nameraný)

M_k - krútiaci moment

G - modul pružnosti v šmyku

l - dĺžka hriadeľa

I_p - polárny moment zotrvačnosti

Po dosadení za I_p pre kruh $\pi D^4/32$ je:

$$M_k = \frac{\pi D^4 G \varphi}{32l}$$

Pre meranie ε sa vychádza z deformácie hriadeľa:

$$M_k = \frac{\pi D^3 \tau_m}{16} \quad \text{kde} \quad \frac{\pi D^3}{16} = W_t = \text{modul prierezu pre kruh}$$

D - priemer hriadeľa

τ - napätie v šmyku (mechanické), prejaví sa povrchovou deformáciou

Cez transformačné vzťahy "šmyk - ťah" dostaneme:

$$M_k = \frac{\pi D^3 G \varepsilon}{8 \sin 2\alpha}$$

aký uhol α ?

$$\varepsilon = \frac{M_k 8 \sin 2\alpha}{\pi D^3 G}$$

ε - pomerné predĺženie povrchu pri uhle $\alpha \rightarrow$ max. pri $\alpha = 45^\circ$ ($\sin = 1$)

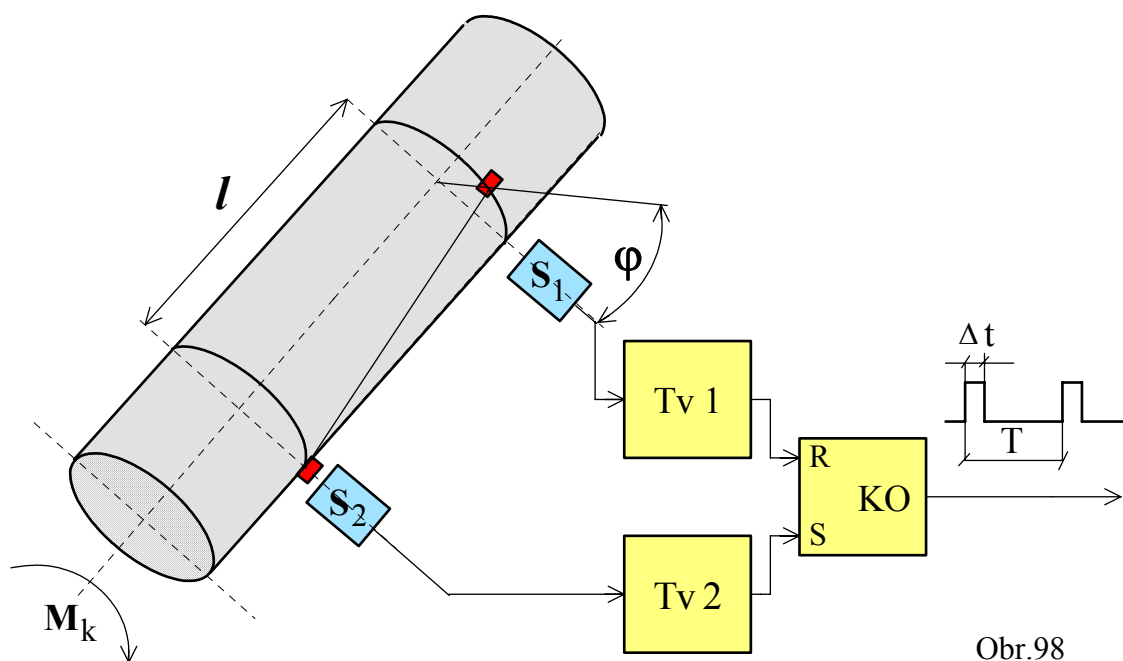
α - uhol medzi osou hriadeľa a smerom predĺženia

Tenzometre

- tenzometre sa lepia šikmo (obvykle 45°) k pozdĺžnej osi hriadeľa
- meria sa deformácia povrchovej priamky
- problém je s vyvedením 4 uzlov mostíka (bezkontaktný prenos?)
- vysoké otáčky \blacktriangleright problém \blacktriangleright odstredivá sila
- rovnaká teplota \rightarrow kompenzácia jej vplyvu

Impulzne

Meria sa uhol skrutu, princíp je na obr 98.



Obr.98

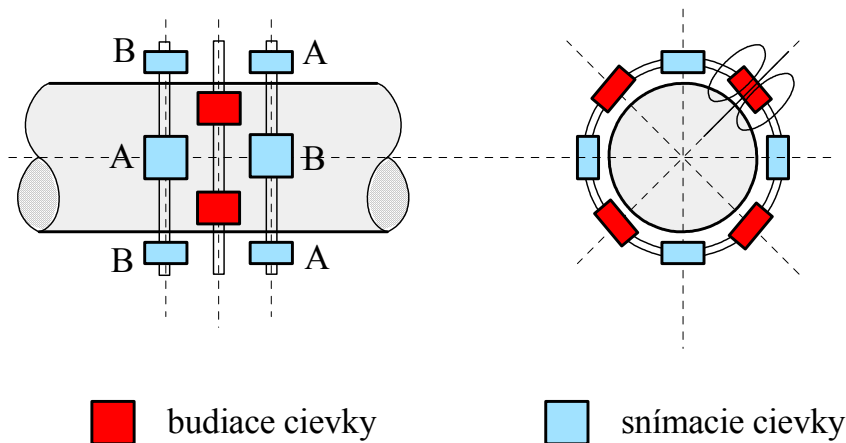
- čas Δt je úmerný uhlu ϕ
- T je doba otáčky

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \rightarrow \varphi = \frac{\Delta t}{T} 2\pi$$

9.4.2. Magnetoanizotropný snímač momentov (na hriadelí)

Snímač je naznačený na obr. 99.

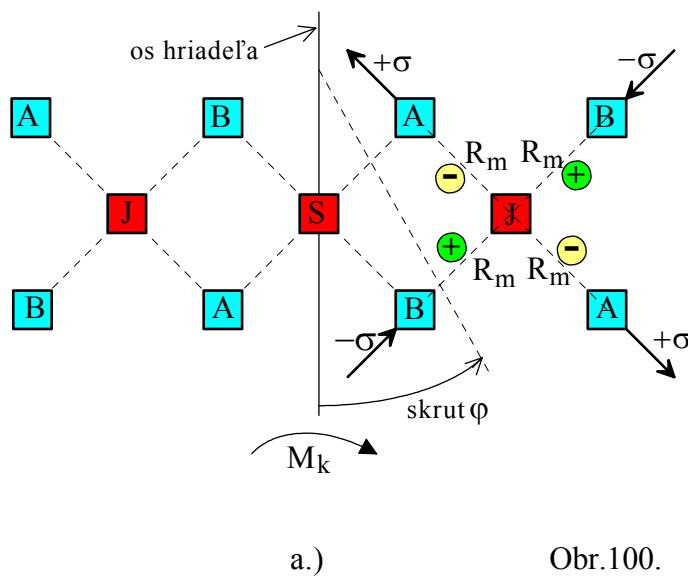
- ♦ hriadeľ musí byť z feromag. materiálu
- ♦ okolo sú sústavy cievok, ktoré sú pevné
- ♦ medzi cievkami a hriadeľom je malá vzduchová medzera
- ♦ systém je transformátorový princíp
- ♦ základná deformácia je skrut od momentu
- ♦ tento sa prejaví sklonom povrchovej priamky (uhol φ) a jej predĺžením
- ♦ v smere kolmom nastane stlačenie materiálu



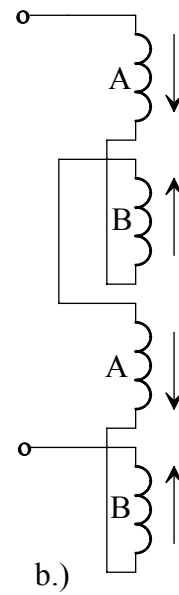
Obr. 99.

Rozvinutá sústava cievok (po obvode) je na obr.100a.

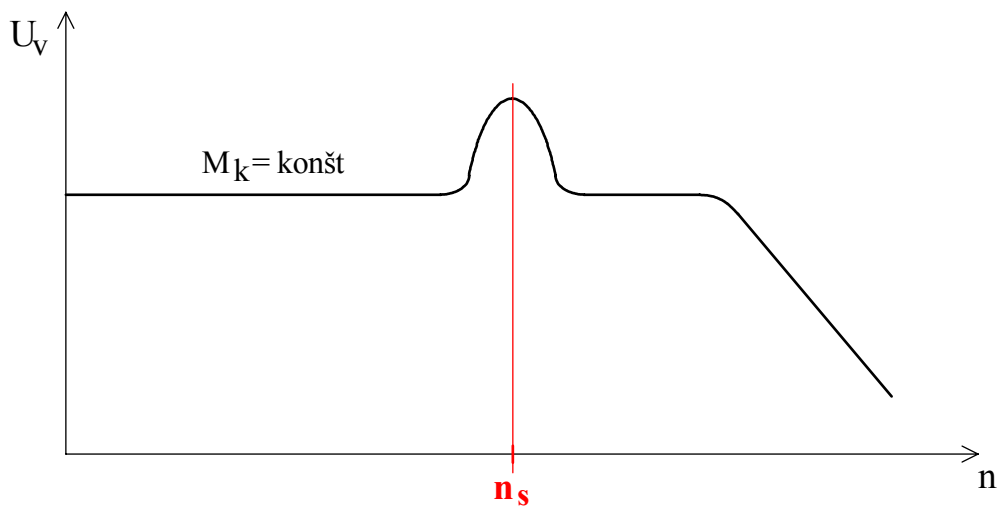
- primárne cievky vytvárajú striedavé mag. pole, póly sú S a J (pre zvolený čas t)
- $M_k = 0 \rightarrow \Phi_m$ primáru vzhľadom na jednu sekundárnu cievku rušia (rovnaké mag. odpory), výstup každej cievky je nulový
- pri pôsobení M_k vznikne uhol skrutu φ a opísané deformácie (ťah, tlak)
- zmenia sa R_m (pre $+\sigma$ klesá, pre $-\sigma$ stúpa), zmenia sa Φ_m a v sekundárnych cievkach vznikajú napätia
- amplitúda závisí od φ , fáza (0 alebo 180°) závisí od prevládajúceho toku (S, alebo J)
- sekundárne cievky v sérii tak, aby sa napätia sčítavali. Napätia v A a B sú v protifáze.



Obr.100.



Na charakteristike (na obr.101) $U_v = f(n)$ je prevýšenie pri tzv. synchronných otáčkach



$$n_s = \frac{60f}{p} \quad \text{kde } f \text{ je napájacia frekvencia, } p \text{ je počet pólových párov}$$

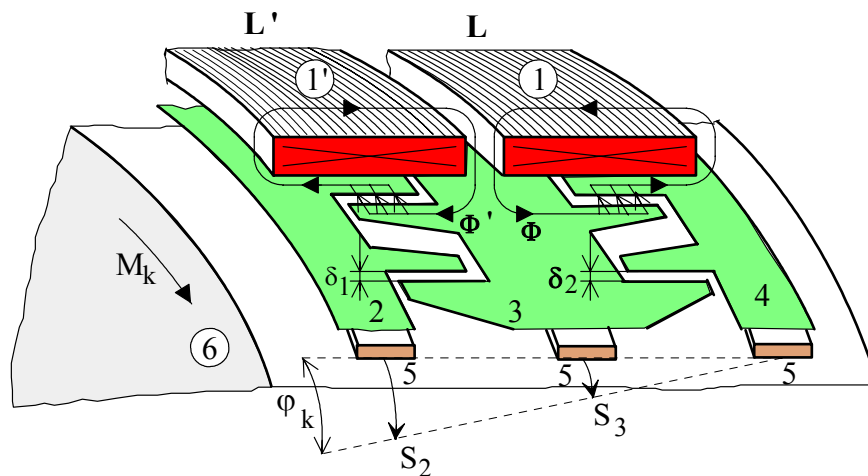
- Pri týchto otáčkach (a v ich okolí) systém nemeria presne
- Zvýšením f_{NAP} môžeme posunúť kritické $n_s \rightarrow$ systém pracuje i pre vysoké otáčky
- Výhoda \rightarrow sústava cievok je nepohyblivá \rightarrow nie sú problémy s prívodmi

Príklad fy ASEA :

rozsah	50 ÷ 100 Nm	opakovateľnosť	0,2 %
linearita	< 1,5 %	frekv. rozsah (vibrácie)	0 ÷ 250 Hz
max. otáčky	20 000 ot/min	teploty	0 ÷ 60 °C
presnosť	± 1 % (v rámci rozsahu 1000 ot/min)		

9.4.3. Iné princípy

Príklad je na obr. 102, kde je indukčný snímač momentov na hriadeľi.



Obr. 102.

- na nemagnetickom hriadeľi 6 sú nemagnetické pásiky 5
- na nich je upevnený magneticky dobre vodivý obvod, časti 2, 3 a 4
- nad nimi sú pevné - neotáčajúce sa cievky 1 a 1'.
- osi cievok sú rovnobežné s osou hriadeľa
- každá cievka si vytvorí svoj Φ_m s naznačenými siločiarami
 - siločiar na vonkajšej strane cievky cez kryt (nie je zakreslený)
 - siločiar na vnútornej strane cievky cez magnetický obvod 3-2, resp. 3-4
- hlavný Φ_m ide cez medzery δ_1 a δ_2 (cez všetky po obvode súčasne)

Veľkosti medzier δ_1 a δ_2 teda ovplyvňujú indukčnosti L a L'

Zapojenie diferenciálne, cievky sú napr. v mostíku.

- ♦ zaťaženie a skrútenie hriadeľa → prierezy S_3 a S_2 sa pootočia
- ♦ časti 3 a 2 sa posunú voči časti 4
- ♦ δ_2 sa zväčší, δ_1 sa zmenší
- ♦ zmenia sa indukčnosti L a L', mostík sa rozváži → výstupný signál

Snímač je medzikus - merný hriadeľ, ktorý sa vkladá (mechanickým spojením) do meranej sústavy.

Výhodou je: - použitie až do 4000 ot/min
- pomerná presnosť a odolnosť
- nepotrebuje vývody z rotujúcich častí

Nevýhodou je:- zložitá konštrukcia
- magnetického obvodu
- celého snímača (malé δ pri "hádzaní" hriadeľa ?)

9.5. Snímače zrýchlenia (obecný smer - priestor)

Obecný princíp - zotrvačná hmota "m" a snímanie sily $F = m \cdot a$

Meranie síl :

- piezoelektrický princíp
- deformačné členy a : - tenzometre
 - fotoelektrický systém
 - kapacitný systém
 - indukčný (transformátorový) systém

Poznámka: Bežné sú systémy s max. citlivosťou v jednej osi, pre obecný smer sa použijú tri v súradných osiach.

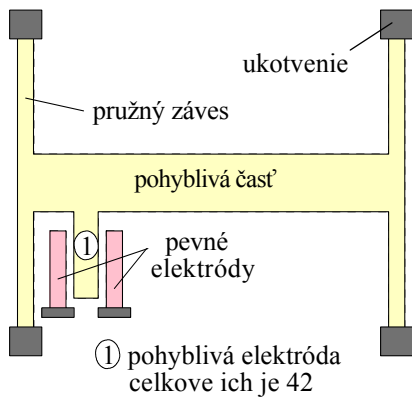
Pri presnom zosnímaní zrýchlenia sa dá určiť rýchlosť i celá pohybová trajektória.
(integrácia, dvojité integrácia)

9.5.1. ADXL 50 (Analog Devices)

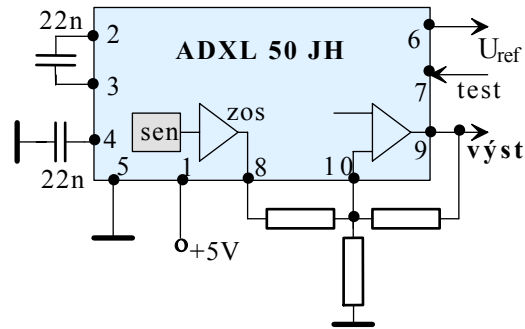
Poznámka: Uvedené ako príklad na komplexné využitie mikroelektroniky v senzoroach

- monolitický čip
- merací rozsah je $0 \div \pm 50$ g (g zemské gravitačné zrýchlenie)
- Δf - od stacionárnych po 1 kHz (vibrácie)
- vlastný senzor - tvar H s rozmermi $500 \times 625 \mu\text{m}$ ($0,5 \times 0,6$ mm) + diferenciálny kondenzátor

Poznámka: Pri týchto malých rozmeroch je Si pružný.



a.)

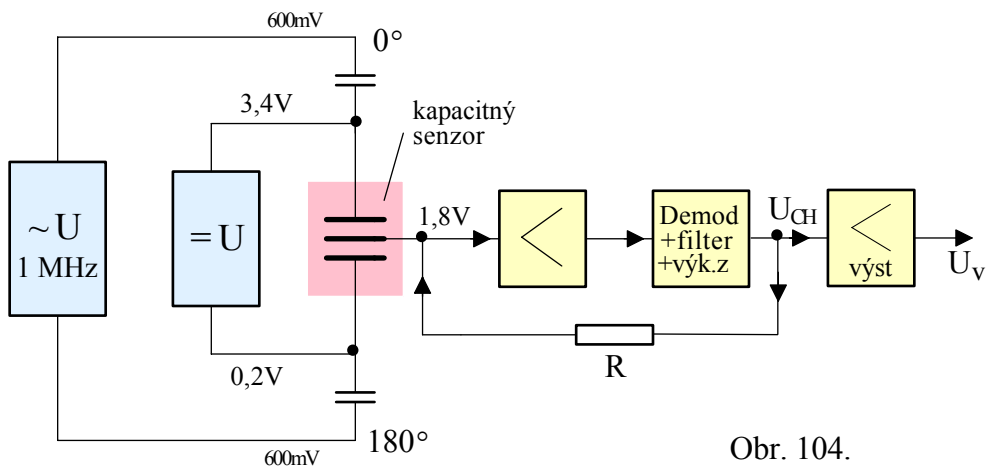


b.)

Obr. 103.

"Drobnosti" :

- ♦ tento kapacitný snímač je tiež ako silový element (elektrostatické sily).
- ♦ kapacita C medzi pevnými a pohyblivými elektródami je $0,1 \text{ pF}$
- ♦ pružný záves má prierez $2 \times 2 \text{ }\mu\text{m}$, dĺžku $200 \text{ }\mu\text{m}$
- ♦ hmotnosť pohybl. častí $m = 0,1 \text{ }\mu\text{g}$



Obr. 104.

- zdroj $\sim U$ (1 MHz) napája kapacitný senzor (pevné elektródy) 600 mV voči zemi, fázový posun medzi nimi je 180° .
- zdroj $= U$ dodáva jednosmerné predpätia na vytvorenie elektrostatických síl.
- stredná elektróda - napätie z výkon. zosilňovača cez R , v rovnováhe $1,8\text{V}$.
- výstup snímača je potom upravené - zosilnené chybové napätie.
- na púzdre je naznačený smer zrýchlenia, ktorý senzor vyhodnocuje ako maximálny.

Poznámka: Pri činnosti sa vyhodnocujú zmeny 20 attofaradov ($20 \cdot 10^{-18} \text{ F}$), čo zodpovedá výchylke $0,2 \text{ \AA}$ (angström = $0,1 \text{ nm}$).

Využitie obvodu je napr. v armáde - meranie explózií, v automobiloch - aktivácia airbagov.

