

Měření neelektrických veličin

Část II

Studijní opora

Ing. Libor Kupka, Ph.D.



Měření neelektrických veličin

Téma 7: Měření polohy I

Studijní cíl

Základní principy nespojitých a elektrických spojitých senzorů pro dotykové měření polohy (relativních a absolutních, translace i rotace).

Doba nutná k nastudování

4 hodiny

Klíčová slova

Poloha, výchylka, mechanický kontakt, mikrospínač, detektor přítomnosti, potenciometr, měřicí můstek, kondenzátor, cívka, magnetický obvod, magnetostrikce, ultrazvuk, optická závora, resolver, indukčosyn, Hallův jev, Hallova sonda

1 Základy měření polohy

Senzory, resp. detektory polohy lze obecně dělit podle mnoha hledisek. Je to dáno širokým spektrem jejich využití v nejrůznějších oblastech a odvětvích. Za základní lze nejspíše považovat rozdělení senzorů polohy na senzory:

- s nespojitou funkcí (dvouhodnotové, detektory přítomnosti) – slouží k indikaci dosažení krajních (koncových) poloh nebo k určení, zda se nějaký objekt nachází v dané oblasti či nikoliv;
- se spojitou funkcí – poskytují průběžnou informaci o poloze.

Například v robotice se senzory polohy řadí mezi tzv. senzory vnější informace, které jsou potřebné k zachycení a monitorování stavu robotu a jeho okolí (Hotař, 2019). Senzory polohy v tomto případě poskytují informace o poloze robotu v prostoru, poloze jeho efektoru vzhledem k objektu v prostoru a data o poloze, tvaru a rozměrech objektů v okolí robotu.

V průmyslové praxi je přesné určení polohy nezbytné pro přesné vykonávání lineárních nebo rotačních posunů u jednoúčelových a obráběcích (i víceosých) strojů, u strojů pro technologie povrchové montáže a u celé řady podobných zařízení ve výrobních linkách i mimo ně. U všech těchto strojů a zařízení se senzory polohy používají pro zjištění polohy, měření výchylky, zajištění bezpečného provozu, i jako součást měřicího členu při zpětnovazební řízení. Při volbě senzorů je nutné zohlednit celou řadu kritérií, především však typ senzoru, jeho přesnost a rozlišení, dynamické vlastnosti, způsob přenosu naměřených dat, rozměry, složitost a

spolehlivost a v neposlední řadě také cenu. Nezbytně nutné je zohlednit materiál měřeného objektu, požadovaný typ detekce (dotykové nebo bezdotykové měření, nespojitá nebo spojitá funkce, translace nebo rotace apod.) a vzdálenost mezi senzorem a objektem, dále brát v potaz vliv okolního prostředí (teplota, tlak, vlhkost, prašnost, elektromagnetické pole, radiace atd.) a zamyslet se i nad dalšími možnými technickými parametry a omezeními (bezpečná funkce, možnosti napájení, typ výstupu, hystereze, maximální proud, frekvence).

Senzory lze dále dělit podle toho, jakým způsobem umožňují stanovit polohu sledovaného objektu v prostoru (resp. jakým způsobem jsou při měření v tomto ohledu použity) na:

- absolutní – poskytují údaj o poloze vzhledem k počátku zvoleného souřadného systému (vzhledem k okolnímu prostředí – terénu, vozovce, podlaze, stěně atp.);
- relativní – vzhledem ke zvolenému referenčnímu bodu (konkrétní části stroje či vozidla, prvku robotu atp.)

Podle charakteru měřené veličiny na:

- posuvné (translační, lineární) – určené pro detekci dosažení koncového bodu nebo přítomnosti objektu v ose nebo pro spojitě měření posuvu, resp. přímočarého pohybu;
- rotační – určené pro měření úhlu natočení, příp. i otáček.

Podle místa měření:

- přímé – senzor je umístěn na konkrétní součásti stroje nebo zařízení, jejíž pohyb má být měřen (není nutný další výpočet za použití vztahů souvisejících s geometrií, převodem apod.), např. přímo na hřídeli motoru;
- nepřímé – senzor je umístěn na dostupném místě, které ale není přímo částí stroje nebo zařízení, jejíž pohyb má být měřen (je nutný další výpočet s využitím vztahů souvisejících s geometrií, převodem apod.), např. umístění snímače až za převodovkou motoru.

Podle charakteru měřené hodnoty (Hotař, 2022):

- absolutní – senzor poskytuje naměřenou hodnotu v celém měřicím rozsahu, tj. pro každou polohu;
- cyklicky absolutní – senzor se chová jako absolutní v rámci určitého intervalu (např. jedné otáčky), je tedy nutné navíc načítat počet intervalů (počet otáček);
- vícestupňové absolutní – senzor se skládá z několika spřažených cyklicky absolutních senzorů s různými intervaly;
- inkrementální – poloha je získána na základě součtu základních přírůstků (inkrementů), přičemž každému inkrementu odpovídá impuls (lze rozlišovat směr pohybu a je nutné stanovit počátek – nulová značka).

Další možné rozdělení je dle fyzikálního principu na senzory kontaktní, indukční, kapacitní, magnetické, odporové, lankové, ultrazvukové, tekutinové a optické. Podrobnější přehled je uveden v tab. 1.

Tab. 1 – Základní přehled snímačů polohy, zdroj autor dle (Hotař, 2022) a (Lufinka, 2022)

Skupina snímačů	Typ snímače (resp. fyzikální princip)	Bližší specifikace	Základní princip měření
Nespojité	Mechanické kontaktní	Mikrospínač/ přepínač	Sepnutí/rozepnutí elektrického obvodu po mech. kontaktu se sledovaným objektem
		Výkyvné pneumatické	Uzavření vzduchového otvoru kuličkou při styku se sledovaným objektem
	Detektory přítomnosti (přiblížení)	Indukční	Změna indukčnosti cívky při změně magnetické vodivosti vlivem přiblížení sledovaného objektu
		Kapacitní	Změna kapacity vlivem přiblížení detekovaného objektu
		Magnetické	Flexibilní jazýčkový kontakt citlivý na magnetické pole
		Magnetoindukční	Změna magnetické indukce vlivem přiblížení detekovaného obvodu
		S Hallovou sondou	Detekce magnetu nebo feromagnetika umístěného na detekovaném objektu
		Fotoelektrické	Jednocestné (s vysílačem a přijímačem), reflexní (s vysílačem a odrazkou) optické závory a snímače s difuzním odrazem
		Ultrazvukové	Detekce ultrazvukového signálu odraženého od detekovaného objektu
		Elektrické spojité	Odporové
Kapacitní	Změna vzdálenosti desek		Změna polohy je převáděna změnu velikosti vzduchové mezery
	Změna plochy elektrod		Změna polohy je převáděna na změnu plochy elektrod
	Změna permitivity		Změna polohy je převáděna na změnu permitivity
Indukčnostní	S uzavřeným magnet. obvodem – tlumivkové		Změna polohy je převáděna na změnu velikosti vzduchové mezery, čímž se mění vlastní indukčnost
	S otevřeným magnet. obvodem – můstkové a transformátorové (LVDT)		Změna polohy je převáděna na změnu vzájemné indukčnosti mezi primárními a sekundárními cívkami transformátoru
	S otevřeným magnet. obvodem		Rotační polohový transformátor umožňující měření úhlu natočení, nebo

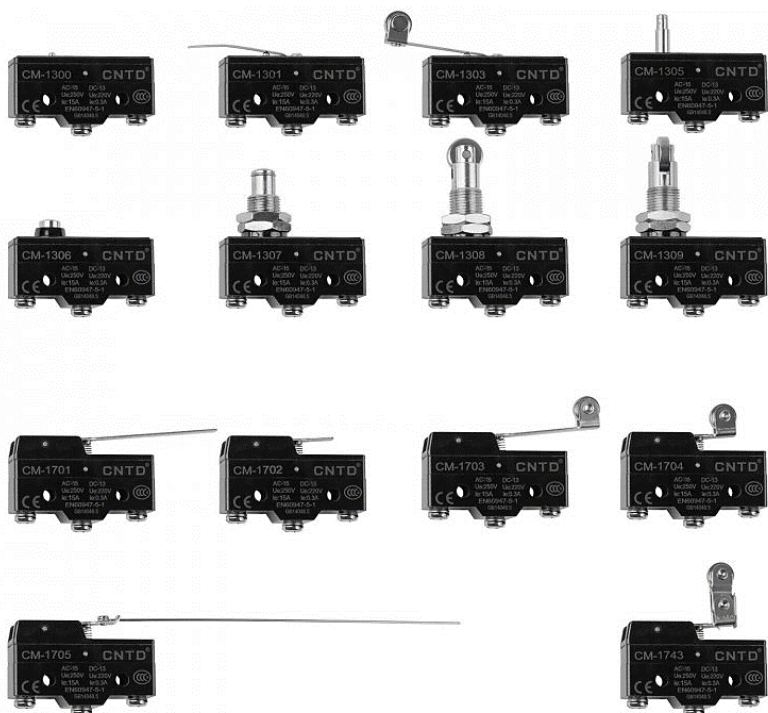
Skupina snímačů	Typ snímače (resp. fyzikální princip)	Bližší specifikace	Základní princip měření
		– resolvery a induktosyny	pevné pravítko nad nímž se pohybuje jezdec spojeny s měřeným objektem
		S potlačeným magnet. polem	Princip vířivých proudů
		Bez feromagnetika	Indukce napětí na základě magnetické vazby obvodů pohyblivými s cívkami
	Indukční	Elektromagnetické	S pohyblivým magnetem, princip Faradayova indukčního zákona
		Elektrodynamické	S pohyblivou cívkou, princip Faradayova indukčního zákona
	Magnetické	S Hallovou sondou	Měření magnetického pole objektu jehož součástí je magnet nebo feromagnetikum
		Magnetorezistivní	Změna el. odporu vlivem změny magnetického pole zapříčiněné pohybem sledovaného objektu
	Magnetostrikční	Elastická deformace	Měří se doba šíření mechanické vlny
	Lankové	Lineární pohyb ocelového lanka	Změna polohy je převáděna na pohyb navíjeného lanka
	Ultrazvukové	Time-of-flight	Odraz UZ signálu
Optoelektrické	Triangulační		Změna polohy je převáděna na změnu úhlu odrazu paprsku od povrchu
	Konfokálně chromatické		Změna polohy je převáděna na detekci barvy odraženého světla
Číslicové	Inkrementální	Optický, magnetický nebo kapacitní	Změna polohy je převáděna na sled impulsů, které se počítají
	S prostorovým kódem	Optický nebo magnetický	Změna polohy je převáděna přímo na binární (nejčastěji Grayův) kód
Tekutinové	Pneumatické	Převodník tlaku (klapka – tryska) na elektrický signál	Změna tlaku v trysce v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu

2 Sensory polohy s nespojitou funkcí

Jak již bylo řečeno výše, slouží senzory s nespojitou funkcí buď k indikaci dosažení krajní (koncové), resp. obecně nějaké sledované polohy. Dále mohou sloužit k tzv. detekci přítomnosti, tedy k určení, zda se sledovaný objekt v daném místě nachází. V přímé souvislosti s tím mohou tyto senzory být kontaktní (taktilní) nebo bezkontaktní (proximitní).

2.1 Mechanické kontaktní

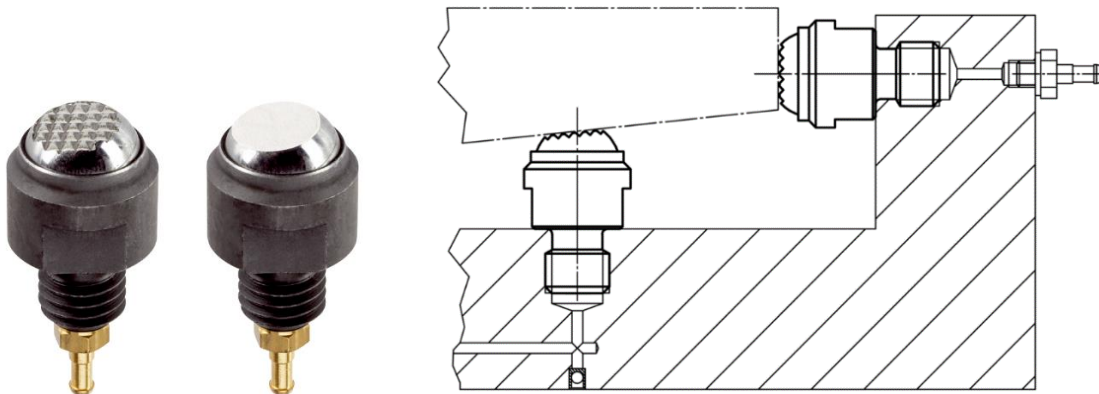
Jedná se o nejjednodušší snímače v různém mechanickém provedení s mikrospínačem. Princip jejich činnosti je založen na sepnutí (NO – normally open) nebo rozepnutí (NC – normally closed) výstupu a tím i připojeného elektrického obvodu po mechanickém kontaktu se sledovaným objektem. Obvykle se jedná o jednopólové přepínače, u nichž je hystereze dána mechanickým uspořádáním a pružinou uvnitř nebo vně ve spojení s páčkou nebo kladkou. Mohou být také v provedení s válečkovým pístem (plunžrem) nebo zacvakávací, určené pro stejnosměrné nebo střídavé napětí. Přehled nejběžnějších typů koncových mikrospínačů je na obr. 1.



Obr. 1 – Různá provedení mechanických koncových spínačů, zdroj (Onpira, 2023)

Snímače se mimo mechanického provedení a způsobu realizace mechanického přenosu ovládací síly na kontakt přepínače či mikrospínače liší také maximálním spínacím proudem a stupněm krytí IP. Jsou velmi levné, umožňují spínání střídavých obvodů, velkých proudů (až 15 A) přitom spolehlivé, ale mají omezenou životnost. Např. koncové mikrospínače Onpira řady CM (Onpira, 2023) mají uváděnu životnost typicky 500 tisíc cyklů (1 sepnutí a 1 rozepnutí). Páčkové přepínače mají uváděnu životnost podstatně nižší, typicky 100 tisíc cyklů, někdy ale i

jen např. 10 tisíc cyklů. Teoreticky by koncové spínače měly zvládnout frekvenci spínání v řádu jednotek až desítek Hz, ale z důvodu omezené životnosti je nelze takto používat a mezi jejich nevýhody lze řadit i nízkou frekvenci spínání.



Obr. 2 – Výkyvné pneumatické kontaktní senzory polohy: provedení s rýhovanou nebo hladkou dotykovou ploškou (vlevo) a příklad umístění při detekci (vpravo), zdroj (Erwin Halder, 2023)

Další variantou mechanických senzorů polohy jsou výkyvné pneumatické senzory, viz např. senzory Halder na obr. 2. Používají se ke kontrole usazení surových obrobků (provedení s kuličkou s rýhovanou dosedací ploškou), nebo předobrobených dílů (s kuličkou s hladkou ploškou). Princip jejich činnosti je založen na uzavření vzduchového otvoru při kontaktu s objektem. Plochy objektu a plošky měřicí kuličky mohou být různoběžné s úhlem až do cca 10° . Senzory se připojují prostřednictvím pneumatických rozvodů k vyhodnocovacím zařízením s ručkovým ukazatelem nebo displejem, příp. ke speciálním kontrolním jednotkám nebo s využitím převodníků i k např. PLC či jiným systémům průmyslové automatizace.

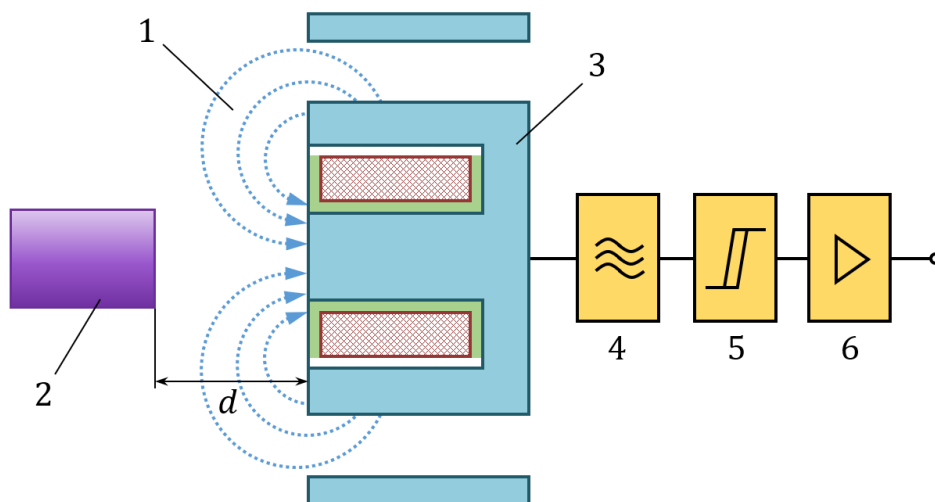
2.2 Detektory přítomnosti

Velmi časté použití širší skupiny snímačů označovaných jako detektory přítomnosti je především ve výrobě (počty kusů na páse, detekce správné polohy, měření otáček, detekce krajních poloh posuvu strojů atd.), ale i jinde (optické závory garážových vrat apod.).

2.2.1 Indukční

Indukční detektory umožňují detekovat přítomnost, resp. rozpoznat přiblížení elektricky vodivých (kovových) předmětů ve vzdálenosti až jednotek centimetrů. Mohou bez potíží spolehlivě pracovat v prašném či jinak znečištěném průmyslovém prostředí, za nepříznivých podmínek na exponovaných místech ve vozidlech a stavebních strojích, v těžkém strojírenství i ve venkovních provozech (Vojáček, 2014), což je jejich největší výhodou.

Velmi zjednodušeně lze princip činnosti indukčních detektorů přítomnosti vysvětlit tak, že senzor vytváří ve svém okolí magnetické pole, které se v případě blízkosti vodivého předmětu změní (Svoboda, 2023). Vyhodnocovací elektronika tuto změnu rozpozná a zajistí přepnutí výstupu z logické nuly do logické jedničky, nebo naopak, podle typu snímače.



Obr. 3 – Schéma indukčního detektoru přítomnosti: 1 – magnetické pole, 2 – el. vodivý materiál, 3 – cívka, 4 – oscilátor, 5 – prahový detektor, 6 – vyhodnocovací obvody a zesilovač, zdroj autor dle (Vojáček, 2014a)

Principiální schéma senzoru je na obr. 3. Oscilátor (4) generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který protéká cívkou (3) a vytváří magnetické pole (1) vystupující z aktivní plochy senzoru (tzv. hrníčku). Dojde-li k přiblížení vodivého materiálu (2), indukují se v něm vířivé proudy a vlastnosti magnetického pole se změní a vlivem vzájemné indukčnosti se změní i impedance cívky. Důsledkem je utlumení kmitů oscilátoru, což vyhodnotí prahový detektor řídicí klopný obvod, který ovládá koncový stupeň (5). Dojde-li k odstranění vodivého předmětu z aktivní zóny senzoru, obnoví oscilátor kmitů (Vojáček, 2014a).



Obr. 4 – Praktické provedení indukčního detektoru, zdroj (Svoboda, 2023)

Indukční detektory (i detektory popisované dále – kapacitní, magnetické a magnetoindukční), viz obr. 4, disponují výstupy NO (normally open) a NC (normally closed) a podle typu funkce jejich výstupu při přítomnosti sledovaného objektu je lze rozdělit (Svoboda, 2003):

- PNP NO – spínací s PNP tranzistorem;
- PNP NC – rozpínací s PNP tranzistorem;
- NPN NO – spínací s NPN tranzistorem;
- NPN NC – rozpínací s NPN tranzistorem;
- PNP programovatelné, spínací/rozpínací (NO/NC) s PNP tranzistorem;
- NPN programovatelné, spínací/rozpínací (NO/NC) s NPN tranzistorem.

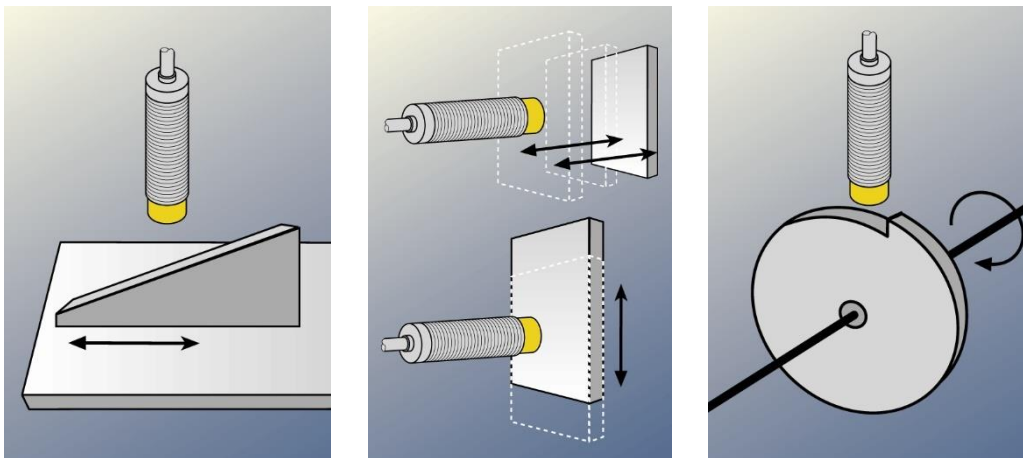
Na trhu jsou dostupné senzory stíněné se zapuštěným hrníčkem (tzv. vazební, obr. 5 vlevo), které lze zcela zapustit a nestíněné s předsazeným hrníčkem (nevazební, obr. 4 a obr. 5 vpravo), které jsou citlivé i na vodivé předměty mimo osu senzoru a musí být při jejich zástavbě dodrženy přesahy aktivní části. Mohou být v provedení dvou- (napájení 24 V a vodič NO nebo NC), tří- (24 V, 0 V a NO nebo NC) nebo čtyřvodičovým (obr. 4, 24 V, 0V, NO a NC).



Obr. 5 – Průmyslová provedení indukčního detektoru: vazební (vlevo) a nevazební (vpravo), zdroj (Sick, 2023a)

Mimo provedení na obr. 4 s přívodním kabelem, jsou senzory dostupné i ve verzi s konektorem (obr. 5) nebo svorkovnicí. Mezi hlavní výhody tohoto typu detektorů patří již zmiňovaná odolnost vůči vnějším vlivům (i značně agresivní prostředí, vysoké teploty, prach a vlhkost), kompaktní rozměry (obvykle válcové provedení od minimálního průměru 3 mm, příp. provedení s vnějším závitem M4), vysoká frekvence spínání díky bezdotykovému principu a tím i dlouhá spolehlivost a živostnost.

Příklady použití detektorů jsou uvedeny na obr. 6. Mohou být použity např. jako detektory přítomnosti na páse i jinde (detektory přiblížení), nebo jako diskrétní senzory otáček ve spojení s excentrickým diskem, příp. (není vyobrazeno) jako diskrétní senzory natočení při použití speciálního schodovitého disku a dále při měření vyosení (např. rotujícího disku nebo hřídele).

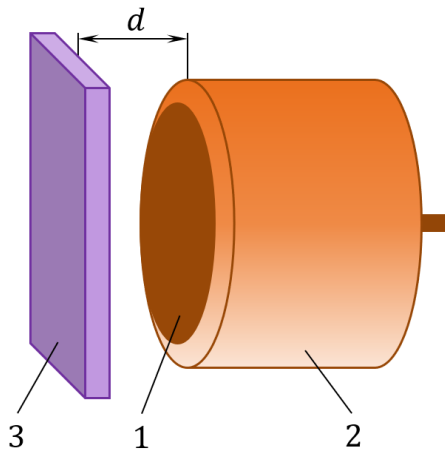


Obr. 6 – Příklady využití indukčních detektorů, zdroj (Vojáček, 2014a)

2.2.2 Kapacitní

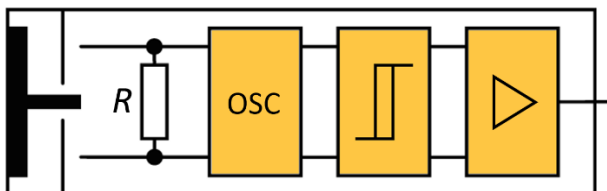
Kapacitní detektory přítomnosti, resp. přiblížení pracují na principu změny dielektrika v důsledku přiblížení sledovaného objektu. Co do fyzického provedení, provozních podmínek a způsobů zapojení, jsou tyto senzory velmi podobné detektorům indukčním. Je u nich ale jeden zásadní rozdíl a tím je možnost jejich využití i při detekci přiblížení objektů z elektricky nevodivých materiálů. Tj. materiálů jako jsou plasty, pryž, dřevo, sklo, keramika, ale i např. kapalin a sytkých materiálů. Oproti indukčním jsou ale méně přesné, teplotně závislé, s menší frekvencí spínání a s možností spínání jen malých stejnosměrných napětí. Maximální

detekovatelná vzdálenost je závislá na materiálu sledovaného objektu (rozhodující je relativní permitivita materiálu).



Obr. 7 – Kapacitní detektor přítomnosti: 1 – kruhová elektroda, 2 – válcová elektroda, 3 – detekovaný objekt, zdroj autor dle (Vojáček, 2014b)

Princip činnosti kapacitního detektoru je znázorněn na obr. 7. Aktivní prvek senzoru – kruhová elektroda, tvoří spolu s vnější válcovou elektrodou, současně stínícím pouzdrem, kondenzátor se jmenovitou kapacitou. Dojde-li k přiblížení sledovaného objektu, tak se vlivem změny dielektrika jmenovitá kapacita senzoru změní. Protože je kapacitní snímač doplněn rezistorem (schéma na obr. 8), dojde tak vlastně k rozladění RC oscilátoru a ten začne kmitat. Napěťový signál na výstupu oscilátoru je dále usměrněn a filtrován. Následně pak je pomocí komparátoru převáděn na logický signál, pomocí něhož je řízen výstupní výkonový spínací stupeň (Vojáček, 2014b).



Obr. 8 – Blokové schéma kapacitního senzoru přítomnosti, upraveno dle (Vojáček, 2014b)

Z hlediska základního principu funkce detektoru přítomnosti lze uvažovat tři základní případy. V případě přiblížení objektu z nevodivého materiálu, lze uvažovat chování běžného kondenzátoru s dielektrikem s permitivitou odpovídající materiálu objektu. Ale v případě přiblížení objektu z vodivého materiálu, se situace změní. Půjde-li o neuzemněný vodivý objekt, bude se chovat jako další elektroda a pak je nutné uvažovat vzduchovou mezeru mezi objektem a snímačem. Schéma náhradního obvodu by se v tomto případě skládalo z paralelní kombinace kondenzátoru (snímač) a dvou sériově řazených kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem (objekt). Je-li navíc objekt uzemněn, lze uvažovat náhradní schéma složené z paralelní kombinace dvou kondenzátorů (snímač a objekt), více viz např. (Vojáček, 2014b) a (Martinek, 2004).

Různá průmyslová provedení senzorů jsou na fotografiích na obr. 9. Podobně jako indukční senzory, jsou vyráběny v provedení s přívodním kabelem nebo konektorem. Mohou být se

spínacím, resp. rozpínacím prvkem v podobě PNP a NPN tranzistoru ve dvou- nebo čtyřvodičovým provedení. A stejně jako senzory indukční, mohou být zcela zastavěny (vazební), nebo s nutným přesahem aktivní části (nevazební).

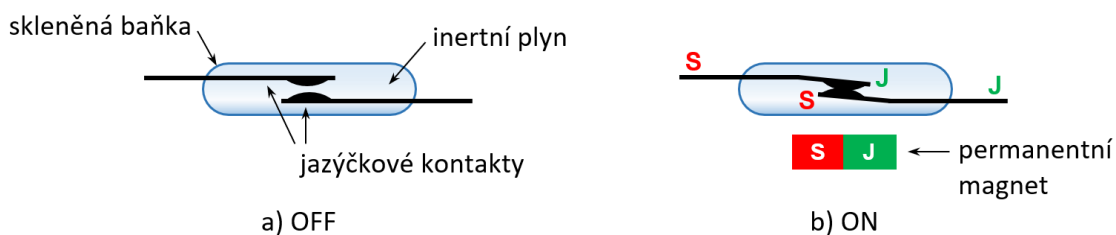


Obr. 9 – Průmyslová provedení kapacitního detektoru, po řadě zleva doprava: ve válcovém pouzdře s vnějším závitem nevazební a vazební, v plochém pouzdře a v pouzdře ve tvaru kvádru, zdroj (Sick, 2023b)

2.2.3 Magnetické

Výhodou magnetických senzorů přiblížení je, při srovnání s detektory indukčními, především jejich větší detekční vzdálenost. A to při stejných nebo i menších rozměrech senzoru a s možností detekce i např. za stěnami, které mohou být z vodivých materiálů.

Za klasický magnetický senzor přiblížení je považován Reedův senzor, který byl vynalezen sice již v roce 1936, ale stále se velmi často používá. Detektor (viz obr. 10) se skládá z flexibilního jazýčkového kontaktu uloženého ve skleněné žárovkové baňce naplněné inertním plynem. Jakmile se v detekční vzdálenosti objeví magnetické pole (permanентní magnet nebo vodič protékající proudem, resp. cívka), v důsledku elektromagnetické indukce se kontakty vyrobené z feromagnetického materiálu nesouhlasně polarizují a tím dojde k jejich sepnutí. Po odeznění účinků pole se kontakty vrátí do výchozí polohy a dojde tím k jejich rozepnutí.



Obr. 10 – Schéma Reedova magnetického detektoru přítomnosti, zdroj autor dle (Vojáček, 2017)

Kontakty jsou dle potřeby spínání nízkonapěťových stejnosměrných (10 až 30 V) či střídavých (20 až 250 V) napětí, nebo indukčních zátěží, potaženy zlatem, rhodiem nebo wolframem. Detekční vzdálenost může být podle druhu použitého magnetu až 10 cm, při velmi malých rozměrech detektoru a dlouhé životnosti kontaktů umožňující vysokou spínací frekvenci.

Podobně jako u indukčních a kapacitních senzorů mohou být magnetické detektory ve válcovém provedení se závitem, v pouzdru ve tvaru kvádru, v identifikačním (dveřním) provedení (pro čtení magneticky kódovaných transpondérů), v provedení pro pneumatické

válce s T-, C- nebo rybinovou drážkou, příp. v jiném speciálním provedení (pro miniaturní válce, robotické ruky apod.), viz např. obr. 11 a (Sick, 2023c).

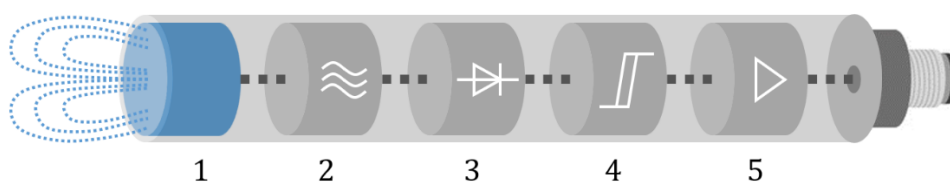


Obr. 11 – Průmyslová provedení magnetického detektoru, po řadě zleva doprava: ve válcovém pouzdře s vnějším závitem, v dveřním provedení, v provedení pro pneumatické válce s T-drážkou a v pouzdře ve tvaru kvádru, zdroj (Sick, 2023c)

2.2.4 Magnetoindukční

Jedná se o moderní snímače označované také jako senzory s nasycovaným jádrem cívky. Svoji konstrukcí jsou velmi podobné indukčním sensorům s rozdílným provedením cívky a jejího jádra (Vojáček, 2017). Jádro cívky je tvořeno amorfním kovem s velmi vysokou relativní permeabilitou (až okolo 500 tisíc), nízkou koercitivní silou a s nízkými ztrátami hysterezí a vlivem vířivých proudů.

Vnitřní struktura senzoru, která je prakticky stejná jako u jiných válcových sensorů, je patrná z obr. 12. Snímač tvořený cívkou z amorfního materiálu generuje magnetické pole. Po přiblížení vodivého předmětu (resp. sledovaného objektu doplněného vodivým materiálem), dojde k ovlivnění magnetického pole senzoru, tj. k deformaci magnetických siločar, jelikož na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou permeabilitou dochází k lomu siločar. V důsledku toho dochází, podobně jako u indukčních snímačů, ke změně frekvence a amplitudy signálu generovaného oscilátorem jehož je cívka součástí.



Obr. 12 – Schéma struktury magnetoindukčního detektoru: 1 – cívka s velkou permeabilitou, 2 – oscilátor, 3 – demodulátor, 4 – vyhodnocovací obvody, 5 – výstupní obvody, zdroj autor

Funkční i konstrukční provedení je taktéž obdobné jako u předchozích typů detektorů. Používají se detektory se spínací i rozpínací funkcí (NO, NC i NO/NC) s PNP nebo NPN výstupem. Nejčastější je provedení senzoru s válcovým nebo kvádrovým pouzdrem, viz např. senzory Turck na obr. 13. Možné je buď provedení pro spínání stejnosměrných obvodů s napětím 10 až 30 V, příp. u některých typů 20 až 60 V, nebo střídavých obvodů s napětím 22 až 250 V, s konektorem nebo kabelovým vývodem.

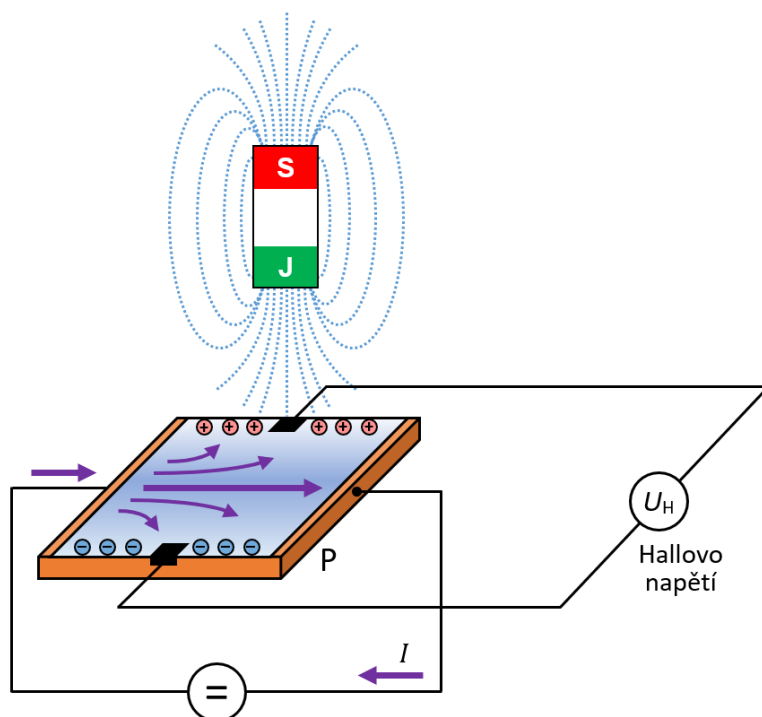


Obr. 13 – Průmyslová provedení magnetoindukčního detektoru, po řadě zleva doprava: v pouzdře ve tvaru kvádru, ve válcových pouzdech s vnějším závitem – s konektorem, s kabelem, zdroj (Hans Turck, 2023)

2.2.5 S Hallovou sondou

Detektory přiblížení s Hallovou sondou v dnešní době nacházejí uplatnění u většiny moderních elektromechanických zařízení a strojů. Princip jejich činnosti je založen na Hallově jevu (či efektu), který byl objeven E. Hallem v roce 1879. Jeho praktické využití přišlo ale až v 60. letech 20. století, když byl v roce 1965 E. Vorthmannem a J. Mauphinem vytvořen integrovaný křemíkový bezkontaktní spínač založený právě na Hallově jevu.

Hallův jev (je ilustrován na obr. 14) způsobí vychýlení směru toku el. proudu v závislosti na velikosti magnetického pole, které je orientováno kolmo k povrchu Hallova elementu (tenké polovodičové destičky tvořené polovodičem typu P) a v důsledku toho je generováno rozdílové Hallovo napětí U_H na bocích elementu.



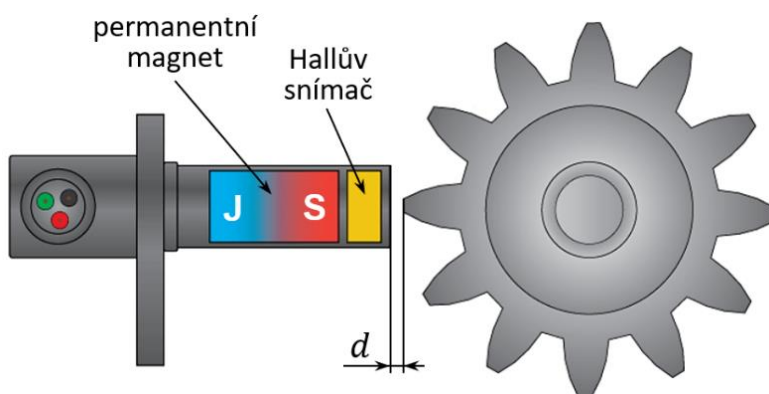
Obr. 14 – Princip vzniku Hallova napětí, zdroj autor dle (Vojáček, 2018)

Není-li Hallův element, jímž protéká proud konstantní velikosti I , vystaven magnetickému poli, je napětí $U_H = 0$. Bude-li naopak na element působit magnetické pole s velikostí indukce B

(resp. o intenzitě H), bude na proud elektronů procházející elementem působit Lorentzova síla a v důsledku toho se elektrony v elementu přeskupí takovým způsobem, že na jedné straně bude více nosičů náboje (elektronů) než na straně opačné, takže obě strany budou mít rozdílný potenciál. Tím vznikne elektrické pole o intenzitě E a napětí je generováno Hallovo napětí, tj. $U_H \neq 0$.

Snímací jednotka detektorů přiblížení je díky zmiňované polovodičové realizaci s výhodou integrována společně s vyhodnocovacími obvody a další potřebnou elektronikou na jednom křemíkovém čipu. To v konečném důsledku přináší výraznou miniaturizaci senzoru přiblížení. Realizují se jako součástky s pouzdry typu TO (obvyklé např. u tranzistorů) se 3 nebo 4 vývody určené do desek plošných spojů, nebo jsou senzory nabízeny v průmyslovém provedení ve válcovém nebo kvádrovém pouzdru, typickém pro indukční a kapacitní senzory. Detektory mohou být konstruovány ve dvojitě provedení – jako přímé senzory s Halloovým snímačem (ty vyžadují pro detekci magnet), nebo jako senzory s vychýleným Halloovým senzorem (detekují přiblížení feromagnetika).

Přímé senzory s Halloovým snímačem umožňují detekovat přiblížení magnetu, takže jím musí být sledovaný objekt osazen. Senzory nejsou citlivé na kovové předměty a lze jimi detekovat objekty i uvnitř neferomagnetických pouzder (např. vyrobených z nerezové oceli, hliníku, mědi a různých slitin). Vyrábí se s válcovými pouzdry s vnějším závitem M8 až M18, s dosahem 50 až 70 mm, tedy o něco menším, než u citlivějších (ale dražších) indukčních senzorů. Výstup je klasický tranzistorový PNP nebo NPN, obdobně jako u ostatních průmyslových detektorů přítomnosti.

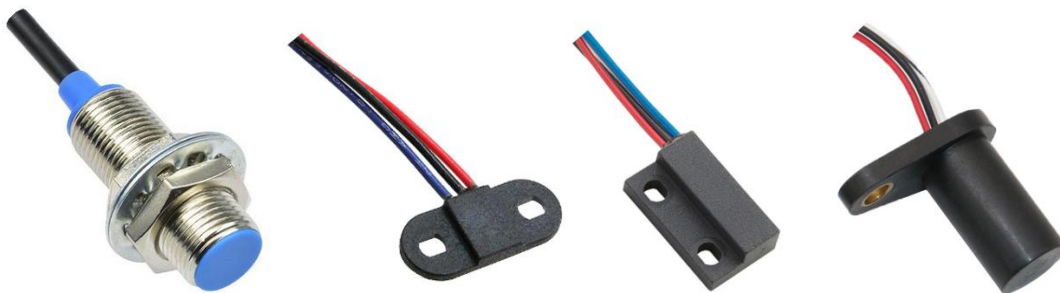


Obr. 15 – Schéma měření otáček s využitím senzoru s vychýleným Halloovým snímačem, upraveno dle (Vojáček, 2018)

Senzory s vychýleným Halloovým snímačem umožňují detekovat feromagnetika, není tedy nutné sledovaný objekt osazovat přímo magnetem. Za Halloovým snímačem je v senzoru umístěn permanentní magnet, viz obr. 15, který generuje magnetické pole. Dojde-li k přiblížení feromagnetika k čelu senzoru, je Halloovým snímačem detekováno vychýlené magnetické pole a to se projeví změnou napětí, která se dále vyhodnocuje. Nevýhodou tohoto jinak elegantního řešení je, že dosah detektoru je jen velmi malý. V průmyslové praxi se tyto senzory nejčastěji používají pro měření otáček s využitím ozubeného kola (obr. 15), které je od čela snímače umístěno ve vzdálenosti $d \approx 2$ mm. Při cyklickém přibližování a oddalování

hmoty (detekce zubů) je na výstupu senzoru odpovídající obdélníkový signál, jehož frekvence odpovídá počtu zubů kola, resp. rychlosti jeho otáčení.

Senzory s Hallovým snímačem jsou vedle magneto-indukčních snímačů díky vysokému stupni integrace a miniaturním rozměrům v současnosti nejrozšířenějšími senzory přiblížení. Ve variantě s vychýleným Hallovým senzorem jsou součástí bezkartáčových stejnosměrných motorů (tzv. EC motorů – s elektronickou komutací, resp. BLDC – brush-less DC). Pro průmyslové využití se vyrábějí v širokém spektru provedení, viz několik příkladů na obr. 16. Mezi přední výrobce těchto senzorů patří americký Honeywell a z evropských výrobců pak německá společnost Sick.



Obr. 16 – Různá provedení senzorů přiblížení s Hallovým snímačem, zdroj (Digi-Key Electronics, 2023)

2.2.6 Fotoelektrické

Vůbec nejrozšířenější elektrické senzory přiblížení pracují na fotoelektrickém principu. Jejich velkou výhodou je velký detekční rozsah, který může při využití laserových diod v optických závorách dosahovat i více jak 50 m. Další nespornou výhodou je, že jimi lze detekovat prakticky všechny typy objektů, dokonce i objekty transparentní, pokud je použit speciální typ senzoru. Fotoelektrické senzory nacházejí mnoho oblastí uplatnění, např. v průmyslu (detekce posunu, přítomnosti výrobků na páse/dopravníku, kontrola obsahu zásobníků, kontrola správné velikosti výrobků, počítání dílů apod.), nebo při zajištění bezpečnosti obsluhy strojů, bezpečného zavření bran a vrat, ve výtazích atp. (optické závory) a v umývárkách, koupelnách a na toaletách (vysoušeče, dávkovače mýdla, osvěžovače vzduchu, automatické splachování atp.).

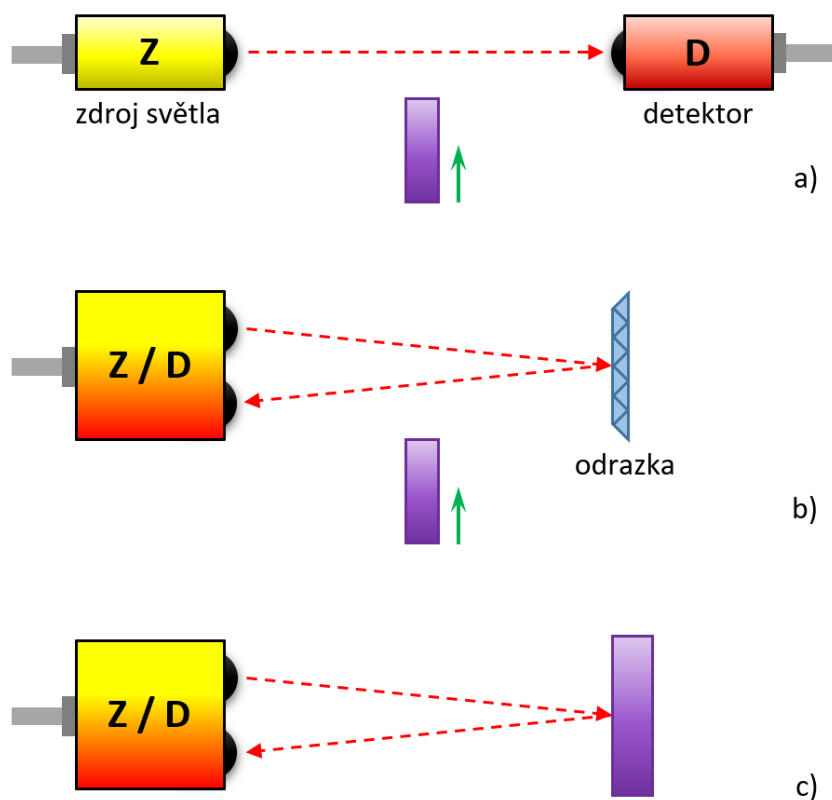
Základní princip je založen vyhodnocení množství světla dopadajícího ze světelného zdroje (infračervená LED, laserová dioda) na světelný detektor (fotorezistor, fotodioda nebo fototranzistor), na jehož základě se určí přítomnost sledovaného objektu.

Lze rozlišit několik základních typů optických detektorů (Svoboda, 2023), (Vojáček, 2005b):

- **Jednocestné optické závory** – Zdroj světla se nachází na jiném místě než vyhodnocovací elektronika (konfigurace vysílač – přijímač, viz obr. 17a). Při přítomnosti objektu v dráze světelného paprsku dojde k jeho přerušení a na detektor dopadá méně, nebo žádné světlo, což je elektronikou senzoru vyhodnoceno a výstup je pak nastaven do logické nuly.

- **Retroreflektivní optické závory** – Zdroj světla a vyhodnocovací elektronika jsou na jednom místě a naproti je odrazivá plocha (konfigurace vysílač/přijímač – odrazka, viz obr. 17b). Princip funkce je samozřejmě obdobný jako u standardní optické závory, detekuje se přerušení světelného paprsku.
- **Retroreflektivní optické senzory** – Zdroj světla a vyhodnocovací elektronika jsou na jednom místě, ale nepoužívá se odrazka. Zdroj světla je nasměrován na sledovaný objekt od něhož se světlo odráží zpět (konfigurace vysílač/přijímač – objekt, viz obr. 17c). Podle množství detekovaného světla je pak vyhodnocena přítomnost nebo nepřítomnost objektu.

Princip uvedených základních typů fotoelektrických detektorů je ilustrován na obr. 17. V průmyslové praxi se pro detekci používají především senzory se zdrojem světla i detektorem v jednom pouzdře (retroreflektivní závory nebo senzory). Součástí senzoru je optický vysílač, nejčastěji LED dioda či PinPoint LED dioda s viditelným spektrem světla (nejčastěji červené barvy) s dosahem v řádu jednotek metrů nebo laserová dioda s dosahem v řádu desítek metrů. Dále optický přijímač v podobě fototranzistoru nebo u výkonnějších senzorů v podobě rychlejší PIN fotodiody (Vojáček, 2005b a Sick, 2023d).



Obr. 17 – Schéma principu optických detektorů přítomnosti: a) jednocestná optická závora, b) retroreflektivní optická závora, c) retroreflektivní optický senzor, zdroj autor.

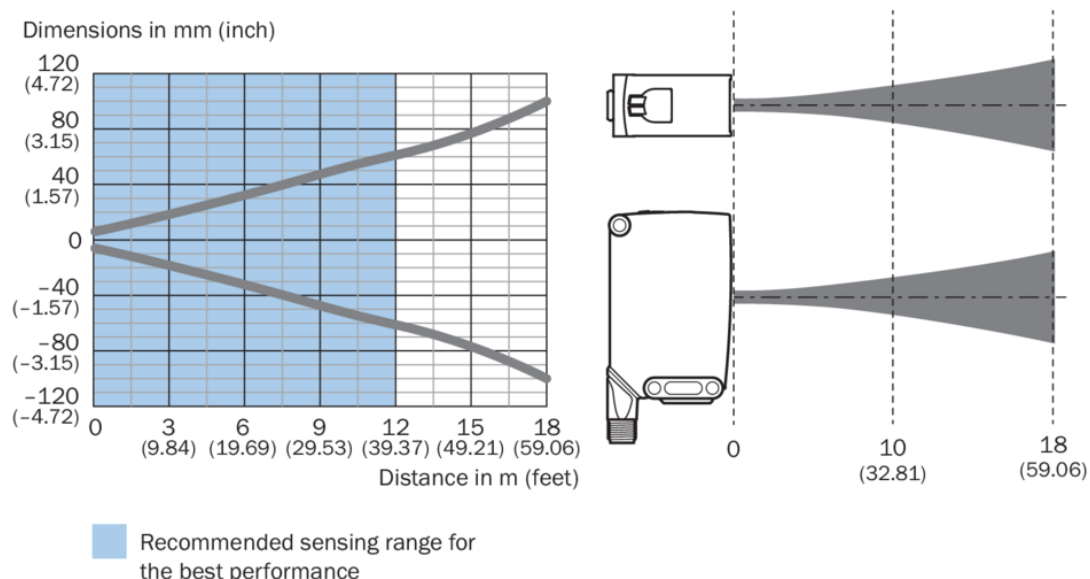
Jednocestné optické závory mají zásadní výhodu ve velkém detekčním dosahu, který může být až více jak 300 m při velmi příznivých detekčních parametrech. To je dáno tím, že světelný paprsek prochází pouze jedním směrem od zdroje k protějšímu přijímači, zatímco u reflektivních závor dochází vlivem dvojího průchodu paprsku minimálně ke dvojnásobnému útlumu (vlivem vlastností odrazky dokonce ještě k většímu), většímu rozptylu paprsku a

obecně se zvyšuje náchylnosti k rušení. Teoreticky je dosah retroreflektivních detektorů oproti jednocestným jen poloviční. Nevýhodou jednocestných optických závor je vyšší cena oproti ostatním řešením, což je způsobeno tím, že je nutné mít vždy samostatný vysílač a přijímač, je nutné zajistit jejich připojení na obou stranách (napájení, datový přenos) a složitější je i související nastavení a seřízení (Vojáček, 2006b).

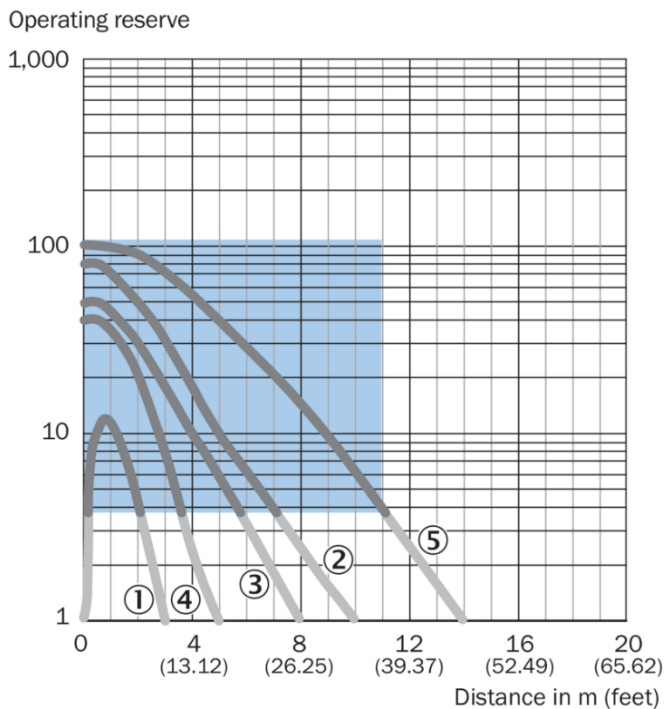


Obr. 18 – Různá průmyslová provedení jednocestných optických závor, postupně zleva doprava: ve válcovém pouzdře s vnějším závitem (řada GR), v pouzdře ve tvaru kvádra (řady W a W45), kabel s konektorem a konektor pro připojení k měřicímu systému nebo adaptéru, zdroj (Sick 2023d)

Příklady detektorů přítomnosti v podobě jednocestných optických závor v průmyslovém provedení od společnosti Sick (vždy vysílač a přijímač, řada WS a GR) jsou na obr. 18. Tento typ detektorů se nejčastěji používá při zajištění bezpečnosti obsluhy strojů, bezpečného zavření bran a vrat, ve výtazích a tam, kde jiné optické detektory selhávají. Oba moduly detektoru jsou obvykle umístěny ve stejných pouzdrech s indikačními prvky a s možností nastavení citlivosti, času a zpoždění sepnutí. Nejvýkonnější senzory řady W45 s IR LED diodou pracují až do vzdálenosti 350 m s průměrem stopy světelného paprsku cca 4,5 m (viz senzor Sick WS/WE45, na obr. 18 třetí zleva).

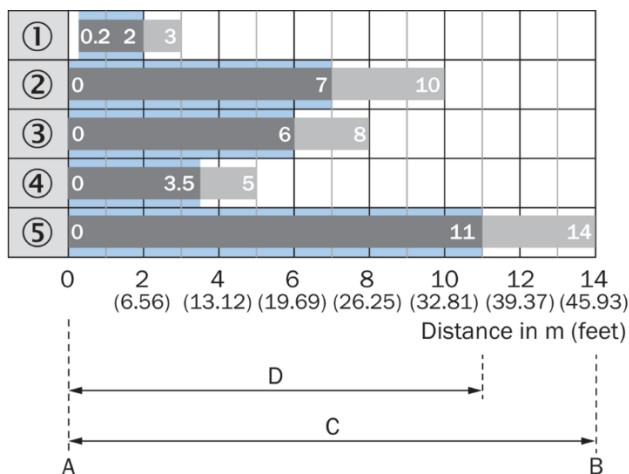


Obr. 19 – Závislost velikosti světelného paprsku na detekční vzdálenosti senzoru Sick WLA26P, zdroj (Sick, 2023d)



Recommended sensing range for the best performance

Obr. 20 – Charakteristiky pěti různých odrazek odolných vůči chemikáliím, zdroj (Sick, 2023d)



Recommended sensing range for the best performance

Obr. 21 – Diagramy spínacích vzdáleností pěti různých odrazek odolných vůči chemikáliím, zdroj (Sick, 2023d)

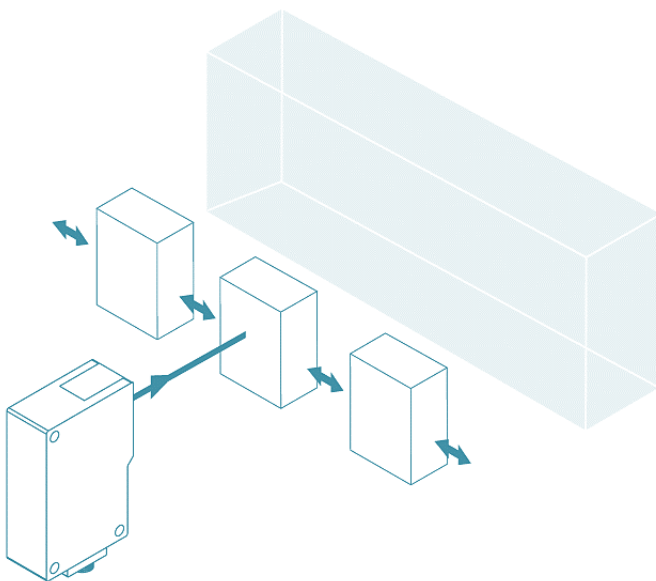
I **retroreflektivní optické závory** pracují na principu přerušení světelného paprsku sledovaným objektem. V závislosti na zdroji světla a na použité odrazce lze běžně detekovat objekty ve vzdálenosti až 10 metrů, nicméně výkonnější senzory mohou mít dosah až 25 m (zdroj LED dioda), příp. i více jak 50 m (zdroj laserová dioda). Detektor navíc ani nemusí být umístěn kolmo ke snímanému objektu (resp. místu detekce), ale naopak se velmi často detektory umísťují z důvodu zamezení zpětného odrazu objektů s lesklým povrchem s odchylkou 10° od normály. Klíčová je volba vhodné reflexní plochy – odrazky, tj. především jejího tvaru, rozměru, příp. dalších vlastností. Používají se reflektivní fólie, standardní odrazky, odrazky odolné vůči chemikáliím a jemné prizmatické odrazky (Sick, 2023d). Na obr. 19 je uvedena závislost

velikosti světelného paprsku na detekční vzdálenosti kompaktního senzoru Sick WLA26P z řady W26 (Sick, 2023d). Na obr. 20 jsou uvedeny charakteristiky a na obr. 21 diagramy spínacích vzdáleností pěti různých odrazek odolných vůči chemikáliím. Příklady detektorů přítomnosti v podobě retroreflektivních optických závor v průmyslovém provedení od společnosti Sick jsou na obr. 22.



Obr. 22 – Různá průmyslová provedení jednocestných optických závor, postupně zleva doprava: ve válcovém pouzdře s vnějším závitem (řada GR), v pouzdře ve tvaru kvádru (řada W), odrazka, kabel s konektorem a konektor pro připojení k měřicímu systému nebo adaptéru, zdroj (Sick 2023d)

Retroreflektivní optické senzory jsou založeny na principu odrazu světla přímo od sledovaného objektu, viz obr. 23. Jejich detekční rozsah je běžně do 0,5 m, ale může být až 1,5 m (IR LED) nebo až do 2 m (laserová LED).



Obr. 23 – Schéma principu detekce s využitím retroreflektivního optického senzoru, zdroj (Vojáček, 2005b)

Retroreflektivní senzory přiblížení lze rozdělit podle základního principu detekce na senzory (Vojáček, 2005b):

- **s potlačeným pozadím** – detekuje se odraz světla od sledovaného objektu v rámci zvolené vzdálenosti detekce a objekty umístěné dále jsou odcloněny;
- **s potlačeným popředím** – detekuje se odraz světla od pozadí za sledovaným objektem (např. nízké objekty na pohybujícím se pásu);

- **energetické** – detekuje se odraz světla od sledovaného objektu, ale detekce je závislá na nastavitelné citlivosti odpovídající potřebné detekční vzdálenosti.

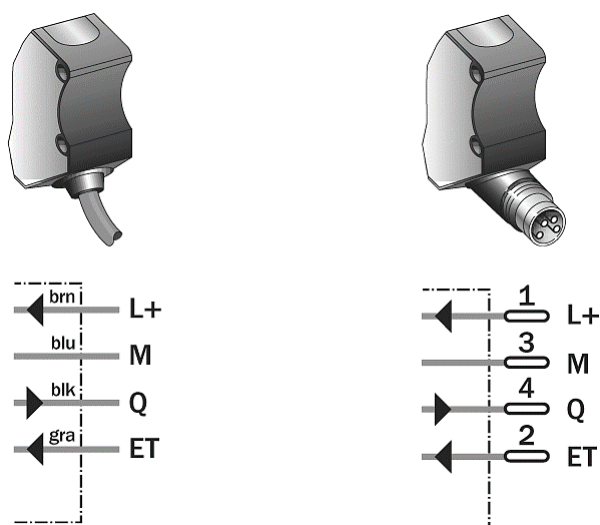
Senzory lze dále ještě rozdělit dle použité optiky na (Vojáček, 2005b):

- **difuzní** – používají se u nich kolimační čočky, pomocí nichž se světlo ze zdroje soustředí do směrového svazku, který neztrácí intenzitu ani na větší vzdálenosti; tím se zvyšuje detekční vzdálenost, ale současně i citlivost na náklon sledovaného objektu od normály;
- **divergentní** – kolimační čočky se v tomto případě nepoužívají, v důsledku čehož je detekční závislost kratší, ale zároveň je zde menší citlivost na náklon sledovaného objektu od normály;
- **konvergentní** – používají se u nich čočky pro zaostření světla do ohniska, což umožní i detekci velmi malých předmětů, i objektů s nízkou odrazivostí povrchu.



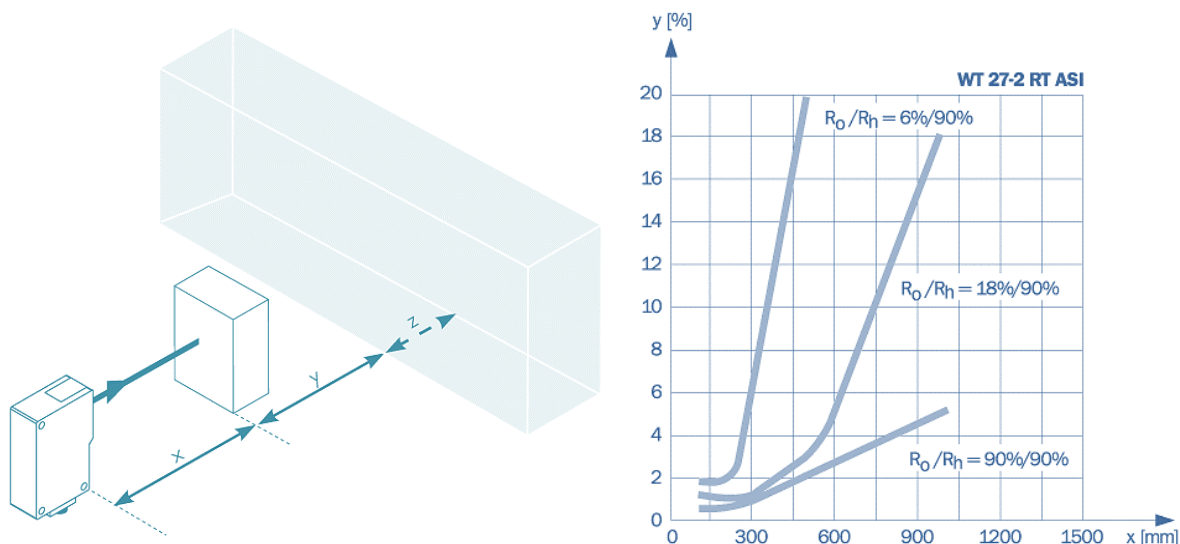
Obr. 24 – Různá průmyslová provedení retroreflektivních optických senzorů, postupně zleva doprava: v pouzdře ve tvaru kvádrů s kabelem (řada W), ve válcovém kovovém a plastovém pouzdře s vnějším závitem (řady GR a GRS), kabel s konektorem a konektor pro připojení k měřicímu systému nebo adaptéru, zdroj (Sick 2023d)

Na obr. 24 jsou příklady retroreflektivních senzorů přítomnosti v průmyslovém provedení od společnosti Sick.

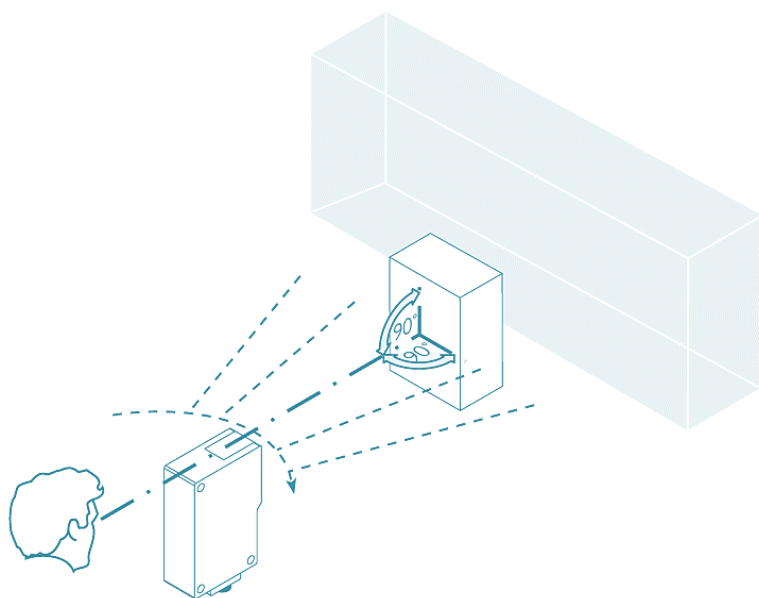


Obr. 25 – Základní provedení retroreflektivního optického senzoru s kabelem nebo konektorem s vyznačením signálů, zdroj (Sick, 2023d)

Technické parametry optických snímačů přiblížení jsou obdobné jako u jiných senzorů přiblížení. Napájení je obvykle stejnosměrné v rozsahu 10 až 50 V nebo střídavé v rozsahu 10 až 265 V. Sensory jsou buď ve válcových pouzdrech různých průměrů s převlečnými maticemi, nebo v pouzdrech ve tvaru kvádru, v obou případech s kabelem se čtyřmi vodiči nebo 4pinovým konektorem, viz obr. 25. Výstupy jsou typu NPN nebo PNP, spínací nebo rozpínací, a lze na ně připojit přímo zátěž. Mód logického výstupu označeného Q, lze měnit buď softwarově nebo pomocí výstupu ET.



Obr. 26 – Ilustrace nastavování vzdálenosti retroreflektivního optického senzoru od detekovaného objektu vůči pozadí, zdroj (Vojáček, 2005b)



Obr. 27 – Ilustrace nastavování kolmosti paprsku retroreflektivního optického senzoru k detekovanému objektu, zdroj (Vojáček, 2005b)

Pro správnou funkci senzoru je nutné provést příslušná nastavení v závislosti na uvažované vzdálenosti mezi senzorem a sledovaným objektem (na obr. 26 označena jako x) a nedetekovaným pozadím (y). V grafu na obr. 27 pro senzor WT 27-RT ASI je y vyjádřeno

v procentech v závislosti na x , pro různé 3 hodnoty poměru odrazivosti sledovaného objektu R_0 a odrazivosti pozadí R_h .

Při praktické aplikaci senzorů se provádí nastavení doby sepnutí logického výstupu s ohledem na detekční vzdálenost a případné rušivé vlivy. Sensory disponují obvykle tzv. učícím módem, který může být u různých výrobců odlišný (poskytují k tomu názorný návod). Obvykle se provádí s využitím tlačítek umístěných přímo na těle senzoru s možnou indikací pomocí LED nebo i displeje. Důležité je u většiny senzorů též nastavení kolmosti paprsku vzhledem ke sledovanému objektu, viz obr. 27.

2.2.7 Ultrazvukové

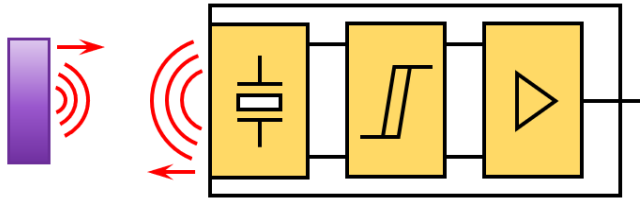
Obdobně jako optické detektory pracují i ultrazvukové senzory přítomnosti. Jejich součástí je vysílač a přijímač ultrazvukového signálu a základním principem je vyhodnocování doby letu (Time of Flight, ToF). Vysílač generuje zvuk o frekvenci vyšší než 20 kHz a ten se odrazí od sledovaného objektu zpět a je detekován přijímačem. Snímač měří čas uběhlý mezi vysláním signálu a jeho přijetím. Při znalosti rychlosti zvuku v suchém vzduchu ($331 + 0,61 T$ m/s, což je přibližně 343 m/s při teplotě 20 °C) a doby letu, lze spočítat dráhu signálu odpovídající dvojnásobku vzdálenosti mezi sledovaným objektem a snímačem.

Výhodou těchto detektorů je možnost detekce objektů z jakýchkoliv materiálů na vzdálenosti až v řádech desítek metrů. Sensory jsou přitom spolehlivé, odolné proti vlhkosti a relativně levné. Lze je použít všude tam, kde selhávají senzory indukční nebo kapacitní, i při detekci průhledných objektů nebo hladiny kapaliny. Jsou tu ale i nevýhody, především nemožnost jejich použití pro vzdálenosti v řádech jednotek mm, což přináší problémy při detekci malých, úzkých, nebo i měkkých objektů, a dále je nevýhodou také závislost měření na teplotě. Co se možností umístění, resp. mechanického upevnění senzorů, jejich zapouzdření i elektrického rozhraní týče, je jejich provedení prakticky obdobné jako u ostatních průmyslových senzorů přiblížení (Svoboda, 2023 a Vojáček, 2005c). Typická provedení těchto senzorů od spol. Sick jsou na obr. 28.



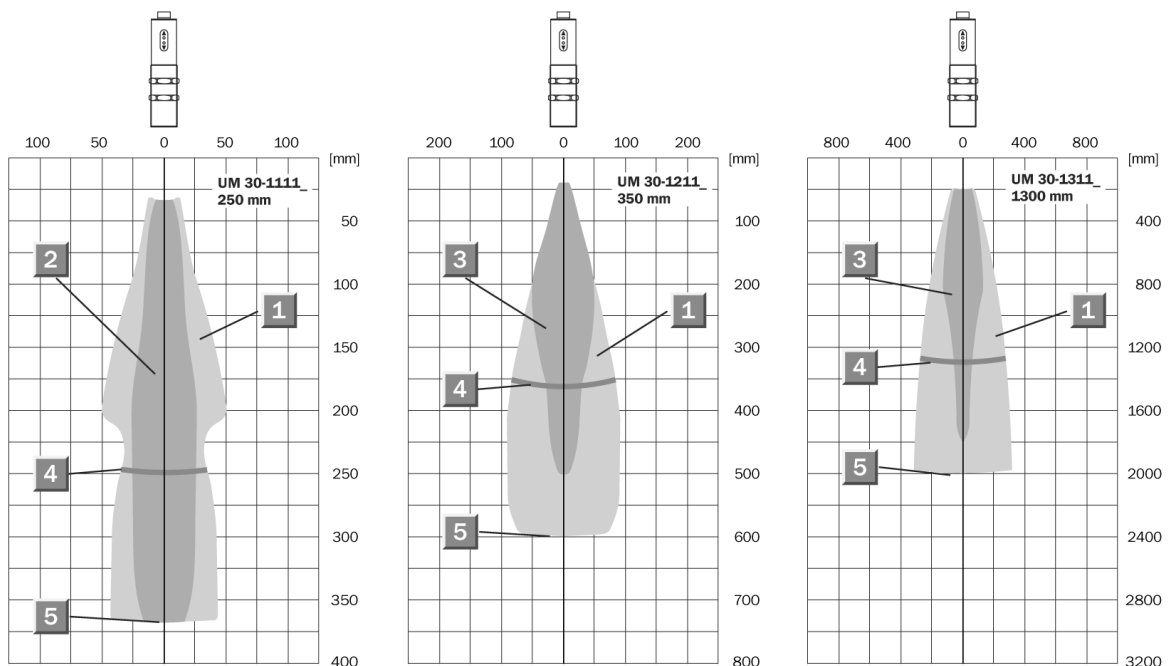
Obr. 28 – Různá průmyslová provedení ultrazvukových senzorů přiblížení, postupně zleva doprava: v pouzdře ve tvaru kvádry s kabelem (řady UC12 a UC30), ve válcovém plastovém (řada UM18) a kovovém (řada UM12) pouzdře a v kompaktním provedení (řada UM30), zdroj (Sick 2023e)

Běžný ultrazvukový senzor přiblížení v průmyslovém provedení je co do struktury podobný senzoru indukčnímu nebo kapacitnímu, viz obr. 29. Citlivá část senzoru je tvořena piezokeramickým měničem s budicími a přijímacími obvody. Následují vyhodnocovací obvody v podobě komparátoru a výkonový koncový stupeň.



Obr. 29 – Schéma ultrazvukového senzoru přítomnosti, zdroj autor

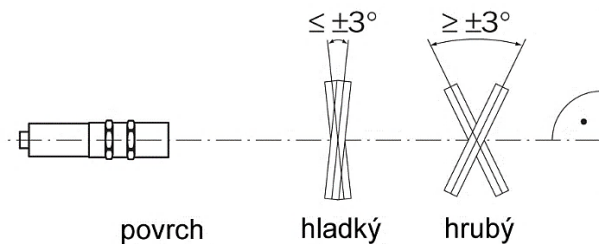
K buzení měniče se používá pulzně spínaný oscilátor naladěný na rezonanční frekvenci piezoelektrického měniče (Vojáček, 2005c). Měnič vyšle několik impulsů (tzv. krátkou dávku) a ty se šíří rychlostí zvuku. Narazí-li na překážku, část vlnění se odrazí a vrátí se do senzoru. Vyhodnocovací obvody vypočítají z doby zpoždění vzdálenost překážky. Nevýhodou je tzv. mrtvý čas, kdy měnič dokmitává, protože až poté může být detekována odezva. V důsledku toho se nachází u ultrazvukového senzoru tzv. mrtvá či slepá zóna, ve které nelze nic detekovat. Základní vlastnosti senzorů vyjadřují jejich vyzařovací charakteristiky udávané výrobcem. Příklady několika charakteristik senzorů Sick řady UM30 jsou na obr. 30.



Obr. 30 – Detekční rozsah senzorů Sick řady UM30: 1 – clonka 500 x 500, 2 – kruhová clonka o průměru 10 mm, 3 – kruhová clonka o průměru 27 mm, 4 – aktivní rozsah, 5 – limitní rozsah, zdroj (Sick 2023e)

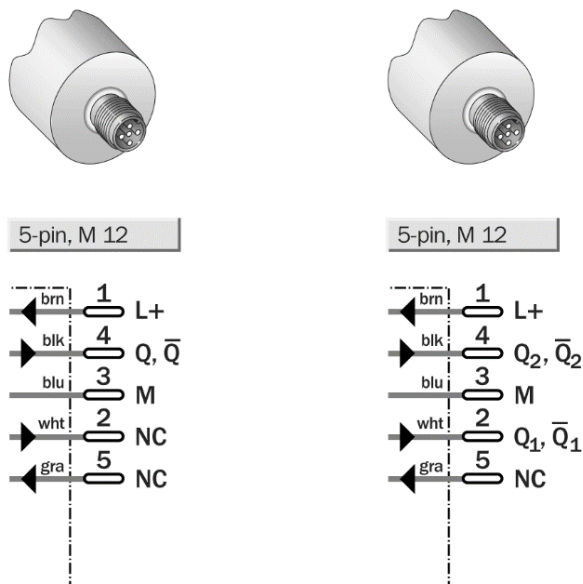
Spínací rozsah, v rámci něhož má docházet ke sepnutí/rozeptnutí výstupu, je vhodné nastavit v oblasti aktivního rozsahu senzoru. Na funkci senzoru má největší vliv hrubost povrchu sledovaného objektu. Bude-li hrubost povrchu menší než vlnová délka ultrazvukového signálu, bude se vlnění dále šířit v souladu se zákonem o rovnosti úhlu dopadu a úhlu odrazu. V důsledku toho je nezbytně nutné zajistit kolmost k odrazové ploše. V případě leštěných

povrchů, může být odchylka od normály maximálně 3° , u povrchů hrubých pak i vyšší (obr. 31), ale za cenu snížení dosahu senzoru.



Obr. 31 – Vymezení maximálního úhlu odklonu od normály u hladkého a hrubého povrchu, zdroj (Vojáček, 2005c)

Ultrazvukové senzory mají obvykle různé možnosti pro nastavení základních parametrů a stejně jako senzory optické, disponují i tzv. učícím módem. Např. senzory spol. Sick disponují dvěma tlačítky a dvěma vícebarevnými LED diodami. Detektory jsou vybaveny jedním nebo dvěma logickými výstupy PNP nebo NPN dle typu spínané zátěže, viz obr. 32.



Obr. 32 – Vyznačení signálů u ultrazvukového senzoru přiblížení s jedním (vlevo) nebo se dvěma (vpravo) logickými výstupy, upraveno dle (Sick 2023e)

2.2.8 Další typy senzorů

Mezi další typy senzorů přiblížení, resp. detektorů přítomnosti lze zařadit senzory tlakové, radary, sonary, dále senzory na bázi Dopplerova jevu, s vířivými proudy a s optickými vlákny. Jejich popis by ale již značně přesahoval rozsah tohoto kurzu.

3 Senzory se spojitou funkcí

3.1 Odporové

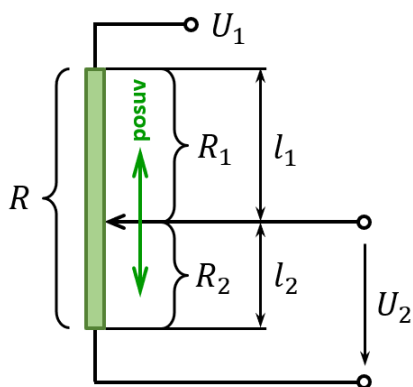
U odporových snímačů polohy je pohyb převáděn na pohyb jezdce (kontaktu) s nímž je sledovaným objekt mechanicky spojen po odporové dráze.

Odporové snímače polohy jsou vyráběny v posuvném (translace) a v rotačním jedno- nebo víceotáčkovém provedení. Odporová dráha může být v provedení lineárním nebo profilovém (s nelineární exponenciální nebo logaritmickou závislostí přenosu na poloze jezdce) a vyrobená z kovového (vinutá drátková z manganinu či PtIr, nebo vrstevná) nebo nekovového (uhlíková, elektrolytická, cermentová kov-keramická nebo CP s vodivým plastem) materiálu. Nejvyšší životnost danou počtem přeběhů dráhy mají vrstevné potenciometry z drahou vyrobenou z vodivých plastů následované hybridními, o něco nižší drátkové, které jsou ale jinak velmi robustní a dobře elektricky zatížitelné.

Rozlišovací schopnost senzoru (nejmenší rozlišitelný délkový nebo úhlový přírůstek odporu) je nejvyšší u vrstevných potenciometrů. U drátkových potenciometrů je dána skokovou změnou odporu při posunu jezdce mezi sousedními závity realizovanými z kalibrovaného drátku o průměru okolo 0,3 mm (Beneš, 2014).

Linearita potenciometru (odchylka výstupního napětí od přímkové statické charakteristiky) se běžně uvádí v procentech napájecího napětí a je nižší u potenciometrů víceotáčkových nebo otočných s větším průměrem (typicky 0,002 %) než u potenciometrů posuvných (0,05 až 0,1 %).

Užitečný signál je u potenciometrů zatížen šumem, který vzniká vlivem změny přechodového odporu při pohybu jezdce po vrstevné odporové dráze (nečistoty, vlhkost) nebo odsakováním jezdce od dráhy vinuté. Odpor u vinutých potenciometrů je více teplotně závislý.



Obr. 33 – Princip potenciometru, zdroj autor

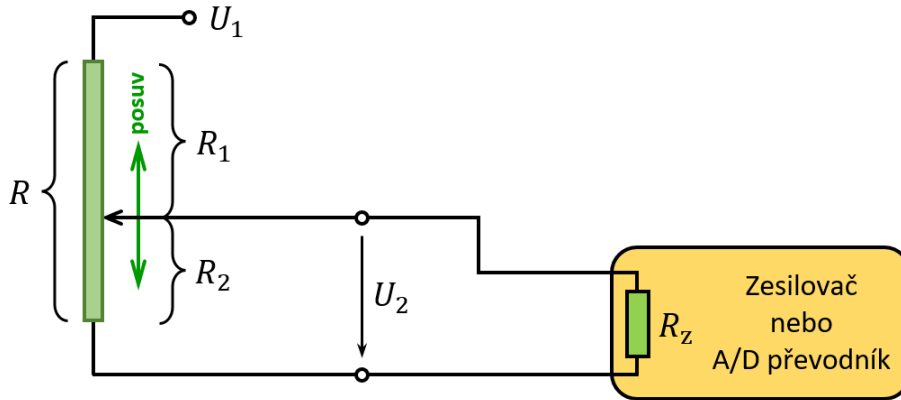
Odporový snímač polohy pracuje na principu odporového děliče s dělicím poměrem definovaným aktuální polohou jezdce na odporové dráze (princip potenciometru viz obr. 33). Velikosti odporů R_1 a R_2 jsou úměrné posuvu

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S}, \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S} \quad (1)$$

Pro napěťový dělič lze v souvislosti s obr. 33 odvodit známý vztah

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 = \frac{R_2}{R} U_1 = KR_2 \quad (2)$$

Při praktickém použití je ale třeba uvažovat zapojení dle obr. 34, kdy je k R_2 paralelně zapojen vstupní odpor následného řetězce R_z .



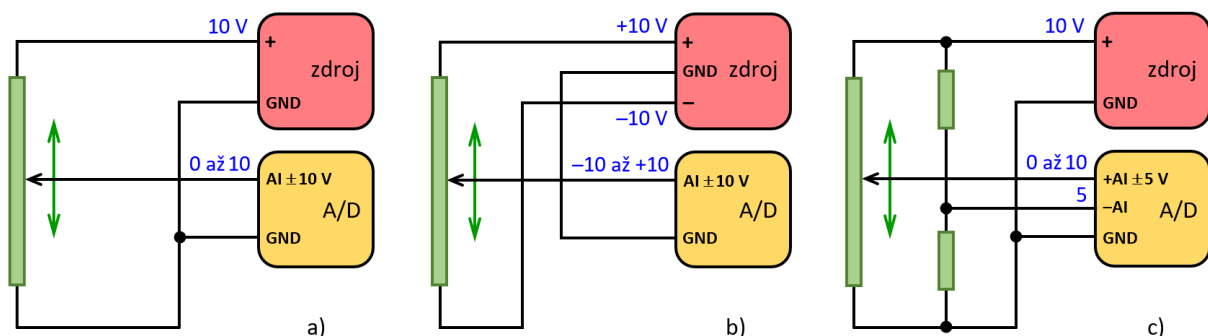
Obr. 34 – Zapojení odporového snímače, zdroj: autor

V tomto případě se projeví nelinearita vztahu – R_z musí být mnohonásobně větší než R_2

$$U_1 = \frac{\frac{R_2 R_z}{R_2 + R_z}}{R_1 + \frac{R_2 R_z}{R_2 + R_z}} U_2 \quad (3)$$

Odpor snímače je typicky $5 \text{ k}\Omega$. Bude-li $R_z = R$, nelinearita bude 12 %, ale jestliže $R_z = 10R$, bude nelinearita nižší, v tomto případě 1,5 %. Vstupní odpor zesilovače (nejčastěji napěťového sledovače) má typicky velikost stovky $\text{k}\Omega$, což je s uvedenou podmínkou v souladu.

Pro správnou funkci snímače je třeba mimo velkého vstupního odporu navazujících obvodů pro úpravu signálu (odpor R_z , viz obr. 34) zajistit stabilitu napájecího napětí v čase. Výstup snímače je totiž přímo úměrný napájecímu napětí. Bude-li napájecí zdroj dávat napětí odpovídající rozsahu A/D převodníku, je možné připojit snímač přímo bez zesilovače.



Obr. 35 – Kompenzace úbytku napětí na vodičích, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)

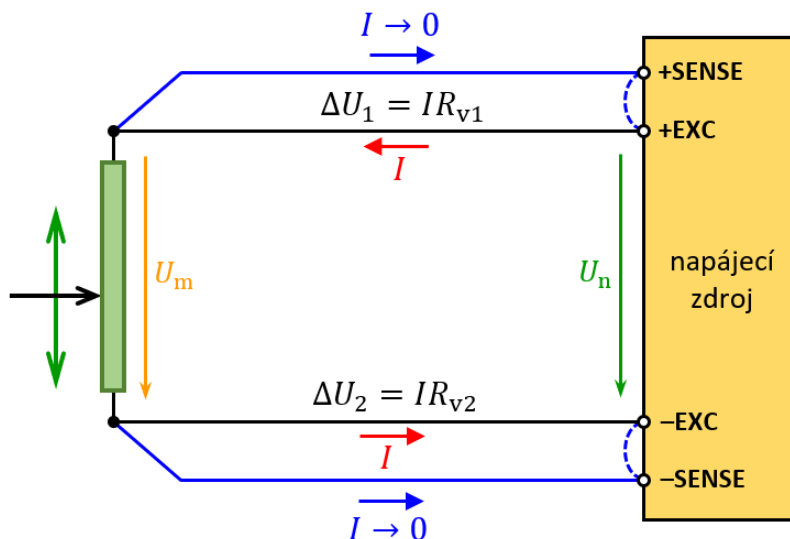
Nejjednodušší možné zapojení je na obr. 35a. Je použito nesymetrické napájení a vstup A/D převodníku je v režimu NRSE (non-referenced single ended) s rozsahem $\pm 10 \text{ V}$. Snímač pak má na výstupu 0 až 10 V, takže se využije jen polovina rozsahu převodníku. U zapojení na obr. 35b je použito symetrické napájení a vstup A/D převodníku je v režimu NRSE s rozsahem $\pm 10 \text{ V}$.

Snímač má v tomto případě výstup ± 10 V (0 uprostřed) a takže se využije celý rozsah převodníku. V posledním zapojení na obr. 35c je použito nesymetrické napájení a vstup A/D převodníku je v režimu DIFFER (diferenciálním) s rozsahem ± 5 V. Na výstupu snímače je pak 0 až 10 V, ale oproti 5 V na vstupu $-AI$ je to ± 5 V, takže se využije celý rozsah převodníku (Lufinka, 2023).

Při připojení odporového snímače k napájecímu zdroji dochází za běžných podmínek (bez kompenzace) k úbytku napětí na připojovacích vodičích. Tento jev se obvykle kompenzuje zapojením na obr. 36. Napájecí zdroj současně odměřuje skutečné napětí na snímači U_m

$$U_m = U_n - \Delta U_1 - \Delta U_2 \quad (4)$$

V případě potřeby zdroj zvýší napětí U_n tak, aby na můstku bylo napětí přesně odpovídající požadovanému. Pak nejsou měřicí vodiče prakticky vůbec zatíženy proudem a úbytek napětí se blíží nule. Je ale nutné, aby byly vždy zapojeny i vstupy SENSE. Pokud se vůbec nepoužijí, je potřeba je propojit s výstupy napájení EXC.



Obr. 36 – Kompenzace úbytku napětí na vodičích, zdroj autor dle (Lufinka, 2022)

Odporové senzory jsou k dispozici v lineárním i rotačním provedení, viz příklady na obr. 37 a obr. 38. Rozsah je u lineárních v řádu desítek mm až jednotek metrů, v rotačním provedení až 360° . Životnost je až 100 mil. cyklů, rychlost až 10 ms^{-1} resp. až $10000 \text{ ot. min}^{-1}$, zrychlení až 200 ms^{-2} .

Výhodou je, že odporové snímače jsou jednoduché a relativně levné. K dispozici je široký výběr typů, délek, kotevních ok, a variant snímačů s vratnou pružinou. Výstupem je přímo elektrické napětí, zapojení je triviální a snímače lze použít i pro vysoké rychlosti posuvu.

Nevýhodou je, že pro posuv jezdce je třeba síla (tření), což může ovlivnit experiment, a menší odolnost proti vlivům prostředí. Životnost snímače je omezená, závisí na materiálu odporové vrstvy a prudce klesá např. při vibracích.



Obr. 37 – Různá průmyslová provedení lineárních potenciometrických senzorů polohy, zdroj (Megatron, 2023)



Obr. 38 – Různá průmyslová provedení rotačních potenciometrických senzorů polohy, zdroj (Siko, 2023)

3.2 Indukčnostní

Základní princip indukčnostních snímačů (pozor, autoři některých odborných publikací i výrobci senzorů místy zaměňují označení indukčnostní a indukční) polohy je založen na převodu polohy na změnu vlastní indukčnosti – **tlumivkové snímače**, nebo vzájemné indukčnosti – **transformátorové snímače**. V dostupné literatuře (Beneš, 2014) a (Šturcel, 2004) se nejčastěji indukčnostní senzory dělí dle uspořádání magnetického obvodu do základních čtyř skupin na senzory:

- s uzavřeným magnetickým obvodem;
- s otevřeným magnetickým obvodem;
- s potlačeným magnetickým polem (s vířivými proudy);
- bez feromagnetika.

Magnetický obvod snímače se skládá z jedné nebo více cívek a může být uzavřený nebo otevřený, s feromagnetickým jádrem nebo bez jádra. Snímací část senzoru může být buď v **jednoduchém** nebo v **diferenciálním** provedení.

3.2.1 S uzavřeným magnetickým obvodem

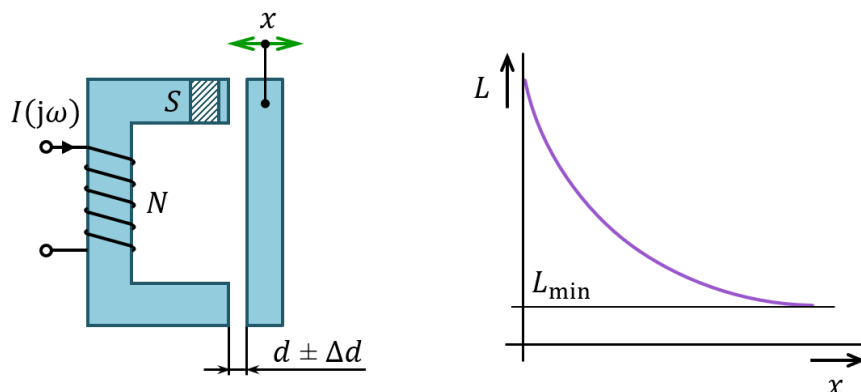
a) tlumivkové s proměnnou délkou vzduchové mezery

Posuv je převáděn na změnu velikosti vzduchové mezery magnetického obvodu s jádrem ve tvaru CI (obr. 39), čímž se mění indukčnost a při zanedbání magnetického odporu feromagnetika, který je výrazně nižší, než odpor vzduchové mezery (Šturcel, 2004) platí

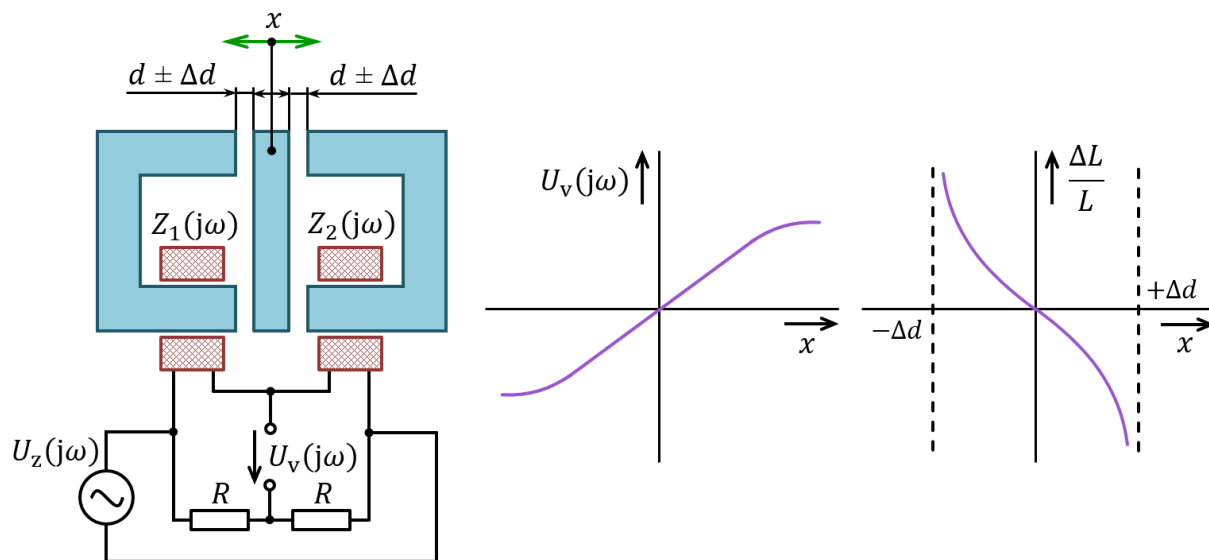
$$L = \mu_0 S \frac{N^2}{2d} \quad (5)$$

Závislost je ale nelineární, což lze vyřešit **diferenčním zapojením** na obr. 40. V omezené oblasti je převodní charakteristika potom lineární. Největší nevýhodou je skutečnost, že uvedené platí

jen pro velmi malou vzduchovou mezeru a snímač lze tedy použít jen pro měření velmi malých posuvů. V jednoduchém provedení se jedná o desetiny mm, v diferenciálním pak o jednotky mm.



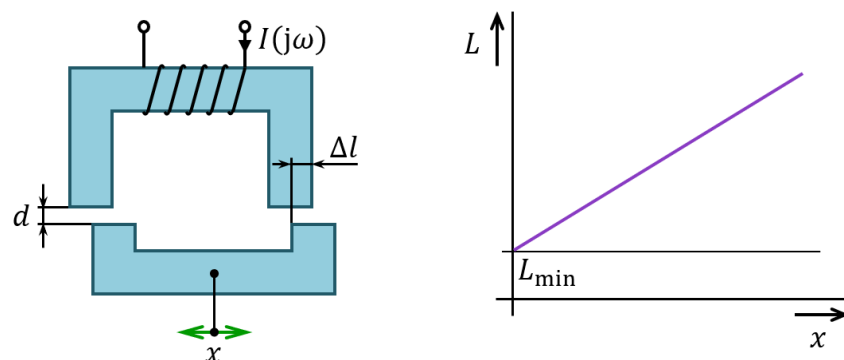
Obr. 39 – Indukčnostní snímač s proměnnou délkou vzduchové mezery, zdroj autor dle (Šturcel, 2004)



Obr. 40 – Indukčnostní snímač v diferenciálním zapojení, zdroj autor dle (Šturcel, 2004)

b) tlumivkové s proměnnou plochou vzduchové mezery

Mírné zvýšení rozsahu měření umožní uspořádání snímače s proměnnou plochou vzduchové mezery na obr. 41. Lze pak měřit posuvy v rozsahu typicky až okolo 10 mm. Výhodou je také lineární závislost.



Obr. 41 – Indukčnostní snímač s proměnnou plochou vzduchové mezery, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Tlumivkové snímače s uzavřeným magnetickým obvodem jsou k dispozici jen v lineárním (ve smyslu pohybu) provedení, pro měření od desetin mm až po nižší desítky mm (max. cca 50 mm). Maximální rychlost je závislá na použité elektronice, která je poměrně složitá a vyžaduje střídavé napájení.

Tab. 2 – Přehled základních typů indukčních snímačů a jejich charakteristik

Typ snímače	Schéma	Charakteristika
Jednoduchý mezerový		
Diferenciální mezerový		
Jednoduchý plošný		
Jednoduchý jádrový		
Diferenciální jádrový		

Výhodou těchto pasivních snímačů je jejich jednoduchost a poměrně nízká cena. Mají integrovanou elektroniku a unifikovaný výstup (obvykle 0 až 10 V nebo 4 až 20 mA). Jsou velmi odolné proti vnějším vlivům a měření je bezkontaktní, bez tření. Jsou ale použitelné pouze pro měření malých vzdáleností. Snímače mohou být použity pro konkrétní typ materiálu (nutné

magnetické vlastnosti), vzhledem k vestavěné elektronice pracují jen v omezeném teplotním rozsahu (typicky 0 až 80 °C) a z důvodu střídavého napájení pracují v omezeném frekvenčním pásmu.

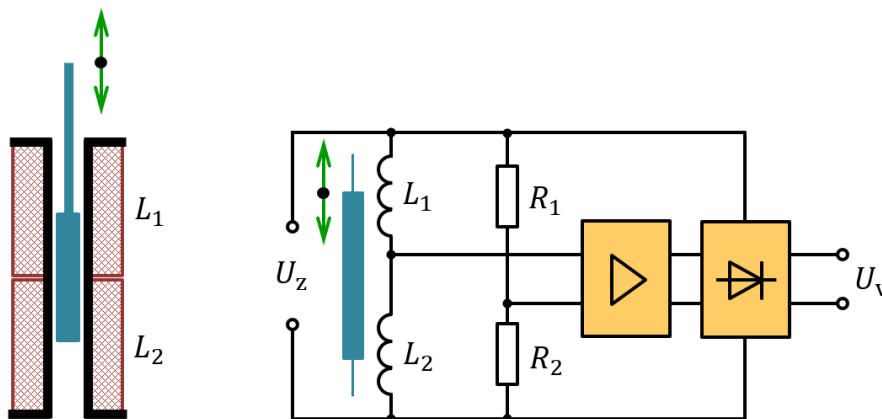
Přehled základních typů indukčnostních snímačů polohy s uzavřeným a otevřeným obvodem a jejich charakteristik je uveden v tab. 2.

3.2.2 S otevřeným magnetickým obvodem

Posuv je v tomto případě převáděn na změnu vzájemné indukčnosti mezi primární a sekundární cívkou (transformátorové, LVDT) nebo na změnu indukčnosti a tím impedance cívky (můstkové zapojení).

a) můstkové

Funkce snímače je založena na změně indukčnosti cívky v závislosti na změně polohy feromagnetického jádra, které je spojené s měřeným objektem. Nejčastější je provedení snímače v diferenciálním uspořádání, viz obr. 42.



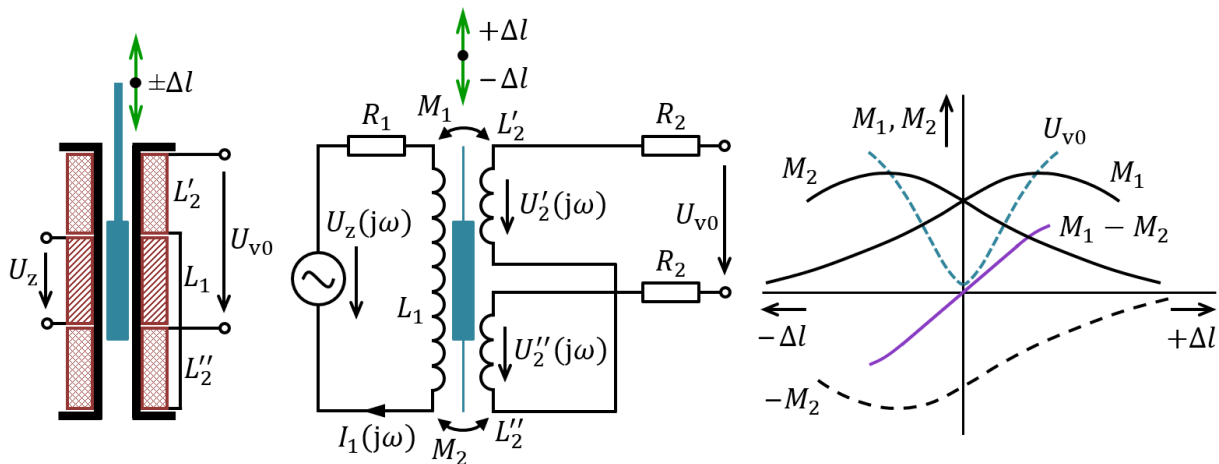
Obr. 42 – Diferenční indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem: uspořádání a schéma můstkového zapojení, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Výhodou tohoto typu indukčnostního snímače je možnost měření větších vzdáleností, ale při menší citlivosti. Zvýšené nároky jsou kladeny na přesné provedení cívek s velkým počtem závitů (vyšší parazitní kapacita). Vlastní vyhodnocování je realizováno v můstku, v němž je velikost diagonálního napětí U_v demodulována za použití synchronního demodulátoru s nosným napětím, které je odvozené z napájecího napětí U_z můstku (Beneš, 2014).

b) transformátorové

LVDT – diferenciální transformátorový snímač (Linear Variable Differential Transformer) je jeden z nejstarších typů snímačů a dodnes je hojně využíván.

Na koncích dráhy snímače se vyskytují nelinearity (viz obr. 43), z toho důvodu je nutné vhodně omezit rozsah. Provedení je pouze lineární (ve smyslu pohybu), možné je měření vzdálenosti od jednotek mm až do cca 600 mm. Snímače je nutné napájet střídavým napětím (nejčastěji o frekvenci 4,8 kHz).

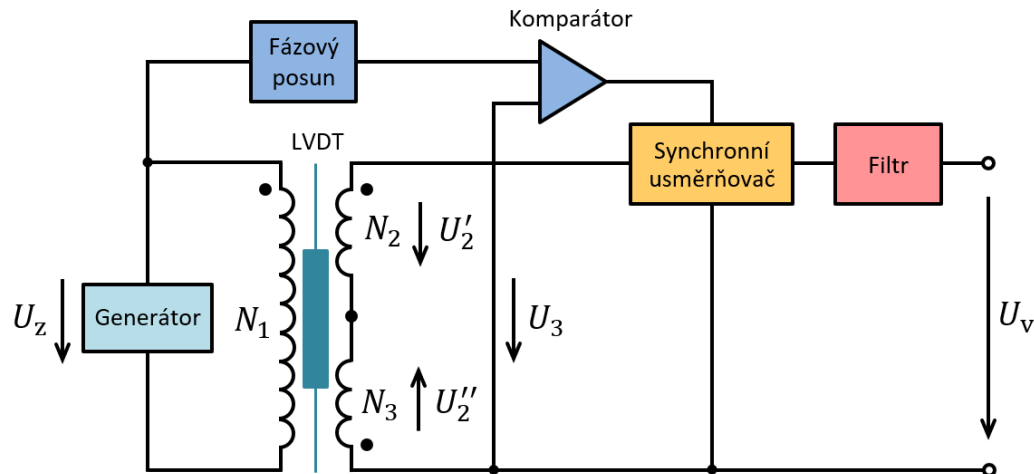


Obr. 43 – Diferenciální transformátorový snímač: uspořádání, náhradní obvod a charakteristiky, zdroj autor dle (Beneš, 2014) a (Lufinka, 2022)

Rozdílový transformátor se skládá z primárního vinutí L_1 s N_1 závitů a dvou symetrických sekundárních vinutí L_2 a L_3 s N_2 , resp. N_3 závitů, zapojených v protifázi. Dojde-li ke změně polohy feromagnetického jádra, které je spojené s měřeným objektem, změní se vzájemné indukčnosti primární a sekundárních cívek. Výstupní napětí naprázdno lze vyjádřit

$$U_{v0} = U_2' - U_2'' = j\omega(M_1 - M_2)I_1 = j\omega(M_1 - M_2) \frac{U_z}{R_1 + j\omega L_1} \quad (6)$$

Schéma praktického zapojení senzoru je na obr. 44.



Obr. 44 – Schéma zapojení diferenciálního transformátorového senzoru, zdroj autor dle (Maixner, 2006)

Praktická realizace snímače je na bázi válcové cívky s pohyblivým jádrem. Lze rozlišit tři základní provedení LVDT senzoru (Lufinka, 2022) a (Micro-epsilon, 2023a):

- **s volným jádrem** – s pístkem, bez kontaktu pevné a pohyblivé části, tj. jádra a těla snímače (pohyb bez tření, bez síly), využívají se ve vozidlech, strojích a na výrobních linkách, jejich rozsah je typicky od 10 mm až do 50 mm, viz obr. 45;
- **s hrotem** – kompaktní snímač s odpruženým nebo neodpruženým hrotem, typicky o průměru do 10 mm a primárním využitím na výrobních linkách při kontrole rozměrů, rozsah je typicky ± 1 mm až ± 10 mm, viz obr. 46;

- **s hliníkovou trubkou** – jsou určeny pro pneumatické nebo hydraulické válce, jako snímací element je použita hliníková trubka, která se zabuduje přímo do pístní tyče válce, rozsah je typicky od 70 mm až do 700 mm, viz obr. 47.

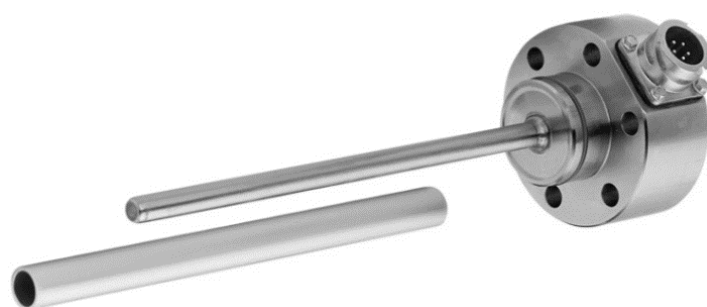
Senzory jsou k dispozici buď samostatně (velmi odolné provedení, teplotně stabilní až do 160 °C), s nutností externí elektroniky pro střídavé napájení a vyhodnocení, nebo s vestavěnou elektronikou. Senzory s vestavěnými elektronickými obvody mohou pracovat jen v omezeném teplotním rozsahu.



Obr. 45 – Průmyslové provedení indukčních LVDT senzorů polohy s pístkem, zdroj (Micro-epsilon, 2023a)



Obr. 46 – Průmyslové provedení indukčních LVDT senzorů polohy s hrotem, zdroj (Micro-epsilon, 2023a)



Obr. 47 – Průmyslové provedení indukčního LVDT senzoru polohy pro pneumatické a hydraulické válce, zdroj (Micro-epsilon, 2023a)

Indukční senzory jsou k dispozici v mnoha provedeních, s různými druhy kotevních ok, příp. s vratnou pružinou, viz příklady konkrétních senzorů na obr. 48. Jsou velmi odolné proti účinkům prostředí, až na senzory s integrovanou elektronikou mají široký teplotní rozsah a lze je použít pro vysoké rychlosti a zrychlení. Jejich životnost je prakticky neomezená.

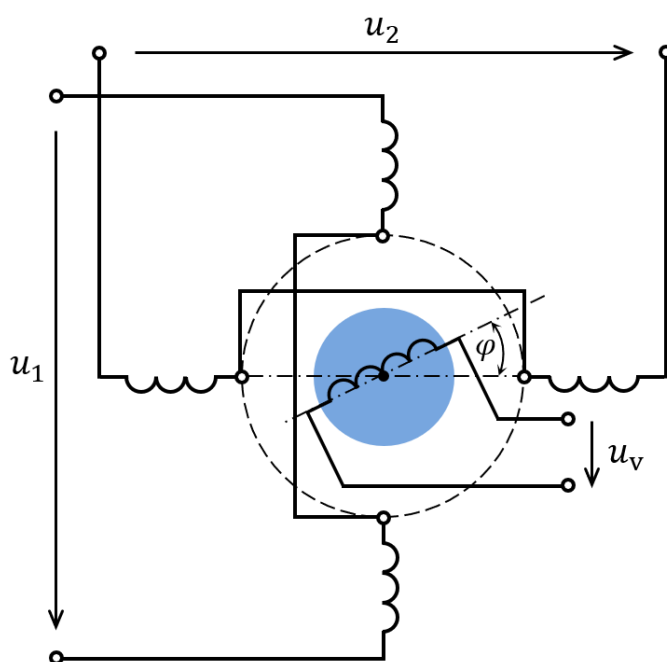
Nevýhodou je, že tyto snímače neexistují v rotačním provedení. K jejich funkci jsou nutné obvody pro střídavé napájení a úpravu signálu. Maximální rychlost je omezena elektronikou a je třeba použít dolnofrekvenční propust pro odfiltrování napájecí frekvence.



Obr. 48 – Různá průmyslová provedení indukčních LVDT senzorů polohy, zdroj (Álava Ingenieros, 2023)

c) resolvery

Resolver, resp. tzv. fázový rozkladač, je rotační polohový transformátor umožňující měření úhlu natočení. Skládá se z dvoufázového nebo třífázového statoru s vinutími navzájem pootočenými o 90° a jednofázového rotoru se střídavým napájením, viz schéma na obr. 49. Fázový posuv indukovaného sekundárního napětí oproti jednomu z primárních napětí odpovídá mechanickému pootočení φ s ním spojeného objektu (Beneš, 2014).



Obr. 49 – Princip resolveru, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Resolvery se v praxi používají k přesnému snímání polohy a měření úhlové rychlosti (resp. otáček). Nejčastěji se používají v servopohonech, především v kombinaci s motory s elektronickou komutací (EC, resp. BLDC motory). Kompletní senzor se skládá z resolveru, pomocných elektronických obvodů a RDC převodníku (resolver-digital converter), který může být realizován také softwarově. Základní blokové schéma je uvedeno na obr. 50.

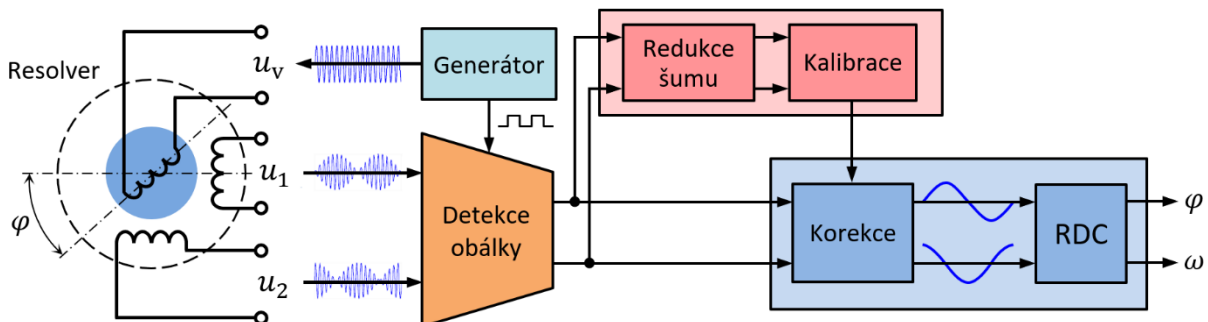
Rotorové vinutí resolveru je buzeno vysokofrekvenčním napětím (řádově jednotky kHz) a v důsledku toho se na navzájem ortogonálních statorových vinutích indukují amplitudově modulované signály se sinovou a kosinovou obálkou odpovídající úhlu natočení hřídele. Obvykle se je resolver buzen referenčním napětím konstantní amplitudy U_v a úhlovou frekvencí ω_{ref}

$$u_v(t) = U_v \sin(\omega_{\text{ref}} t) \quad (7)$$

Při otáčení rotoru se na výstupních vinutích statoru objeví amplitudově modulované signály

$$\begin{aligned} u_1(\varphi, t) &= U_v \sin(\omega_{\text{ref}} t) K \sin(\varphi) \\ u_2(\varphi, t) &= U_v \sin(\omega_{\text{ref}} t) K \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

kde K je tzv. efektivní transformační poměr resolveru a φ představuje úhlové natočení rotoru resolveru. Vzorkování uvedených výstupních signálů je synchronizováno s budičím signálem resolveru.



Obr. 50 – Schéma zapojení resolveru, zdroj autor dle (Guo, 2019) a (Qin, 2019)

Amplitudově modulované signály u_1 a u_2 , viz (8), mají sinovou, resp. kosinovou obálku, ale jsou současně zatíženy poruchami (kolísající amplituda a stejnosměrná složka budičeho napětí) způsobenými především excentricitou rotoru a nedokonalou ortogonalitou statorových vinutí. Pomocí obvodů pro předzpracování (redukce šumu a kalibrace) dochází ke korekci, takže do RDC převodníku již vstupují dva orto-symetrické signály ve tvaru

$$\begin{aligned} u_{\text{sin}} &= \sin(\varphi) \\ u_{\text{cos}} &= \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

Nakonec se v RDC pomocí vhodných demodulačních algoritmů (např. arkus-tangentní metoda, metoda fázového závěsu – PLL a kompenzační metoda, více viz Qin, 2019) vypočte odpovídající úhlové natočení (poloha) a úhlová rychlost.

Resolvery se vyrábí v průvlečném provedení pro umístění přímo na hřídel motoru nebo v provedení s hřídelí, viz obr. 51. Jsou velmi spolehlivé, odolné proti vibracím (až 20 G

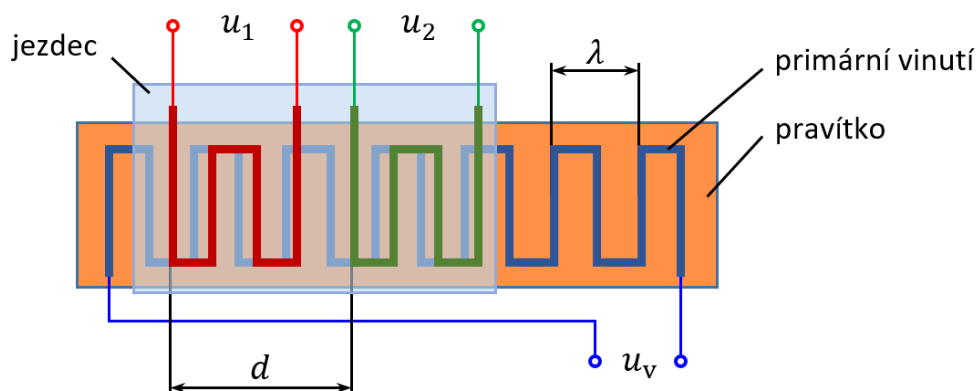
v rozsahu 10 až 500 Hz po dobu dvou hodin). Pracují bez tření a v širokém teplotním rozsahu (běžně -60 až $+160$ °C), jelikož neobsahují žádnou zabudovanou elektroniku.



Obr. 51 – Průmyslová provedení resolveru: průvlečné na hřídel motoru (vlevo sestavený resolver, uprostřed rotor a stator odděleně) a s hřídelí (vpravo), zdroj (Tamagawa Seiki, 2017) a (AMCI, 2023)

d) indukčiny

Základem indukčiny (schéma na obr. 52) je pevné pravítko (resp. měřítko), nad nímž se pohybuje jezdec spojený s měřeným objektem. Jezdec obsahuje dvě vinutí, která jsou stejně jako v případě pravítka realizována ve formě meandru a jsou navzájem posunuta o 1,25násobek šířky jednoho meandru λ pravítka. Vinutí se realizují jako tištěné spoje na podkladech ze skla, keramiky nebo magnetické oceli s izolační vrstvou (Beneš, 2014).



Obr. 52 – Princip indukčiny, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Budou-li přivedena na jezdec dvě napětí (primární) sinového průběhu navzájem posunutá o $\pi/2$ (tj. o 1/4 periody)

$$\begin{aligned} u_1 &= A \sin(\omega t) \\ u_2 &= A \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (10)$$

bude se při vzájemné sinusové vazbě dané geometrickým uspořádáním v sekundárním vinutí indukovat součtové napětí

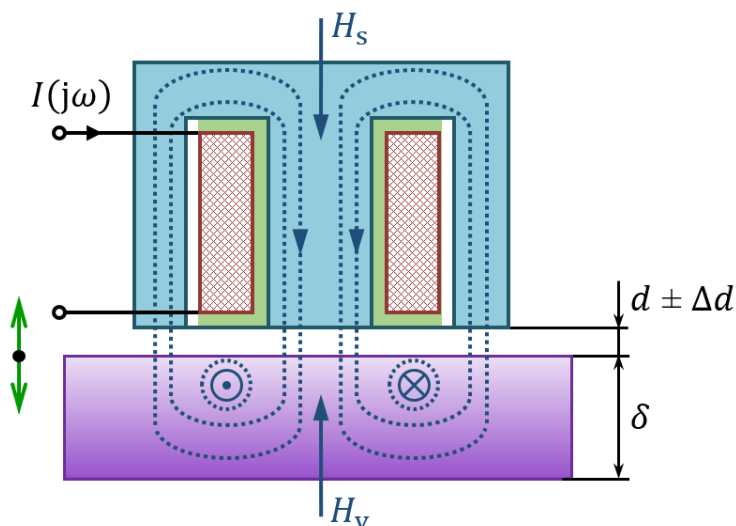
$$u_v = A \sin(\omega t) \sin(\varphi) + A \cos(\omega t) \cos(\varphi) = A \cos(\omega t - \varphi) \quad (11)$$

Výstupní napětí u_v má shodnou amplitudu a frekvenci jako obě vstupní napětí u_1 a u_2 . Posun jezce oproti pravítku je úměrný fázovému zpoždění φ . Jelikož fázové zpoždění nezávisí na amplitudě a frekvenci, používá se v praxi spíše řešení, kdy se měří délka intervalu mezi průchody nulovým napětím. Při nesinusovém napájení je v tomto případě napětí indukované

v měřítku dáno superpozicí dvou napětí s obdélníkovým průběhem. Fázový posuv lze pak vyhodnotit na základě posunu náběžné hrany indukovaného napětí oproti jednomu z primárních napětí (Beneš, 2014).

3.2.3 S potlačeným magnetickým polem (s vířivými proudy)

Je-li elektricky vodivý a současně magneticky nevodivý (diamagnetický) materiál umístěn ve vysokofrekvenčním magnetickém poli snímače s intenzitou H_s , indukují se v něm vířivé proudy v jejichž důsledku je buzeno magnetické pole o intenzitě H_v , viz obr. 53. Směr intenzity H_v je dle Lenzova pravidla opačný než směr intenzity H_s (odtud označení potlačené magnetické pole). Podmínkou je, aby tloušťka materiálu δ odpovídala možné efektivní vzdálenosti působení pole (siločáry), s čímž souvisí i vzdálenost cívky (čela senzoru) od materiálu. Jinak se snižuje účinnost snímače a dochází ke ztrátě citlivosti.



Obr. 53 – Princip indukčního snímače s vířivými proudy, zdroj autor dle (Šturcel, 2004) a (Beneš, 2014)

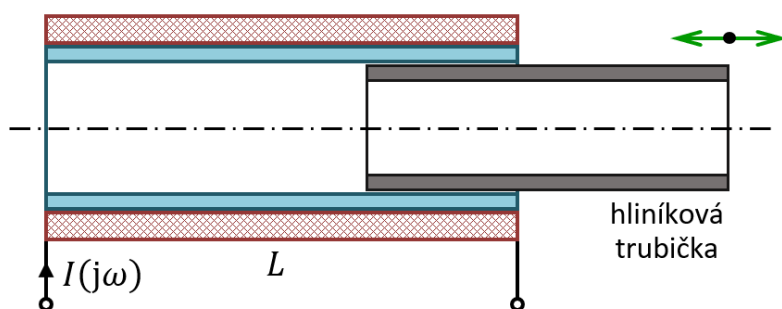
Budící cívka snímače je součástí LC oscilátoru, který po připojení napájení začne kmitat, čímž vznikne vysokofrekvenční elektromagnetické pole usměrněné pomocí feritového jádra přes aktivní plochu do osy senzoru. Dojde-li k přiblížení elektricky vodivého materiálu k čelu senzoru, dojde vlivem vířivých proudů ke snížení velikosti indukčního toku, tím i ke snížení indukčnosti budící cívky a současně k utlumení kmitů oscilátoru. Výstup oscilátoru je přiveden do komparátoru, který vstupní hodnotu napětí porovná s prahovou hodnotou a překlopí výstupní klopný obvod. Využití těchto senzorů je tedy buď při detekci přítomnosti, nebo při zapojení snímače do můstku pro spojitě měření v rozsahu typicky do 50 mm s analogovým proudovým výstupem 0 až 20 mA. Praktické využití je např. při měření házivosti (nevyváženosti) rotujících součástí, zjišťování koroze pod ochrannými povrchy nebo rozlišování kovů a slitin v mincovních automatech (Beneš, 2014).

Příklady průmyslových provedení indukčních senzorů polohy se spojitým výstupem od spol. Balluff jsou na obr. 54.



Obr. 54 – Průmyslová provedení indukčních senzorů polohy, po řadě zleva doprava: ve válcovém pouzdře s vnějším závitem – vazební s kabelem a nevazební s konektory, v pouzdech ve tvaru kvádra – s kabelem a s konektorem, zdroj (Balluff CZ, 2023a)

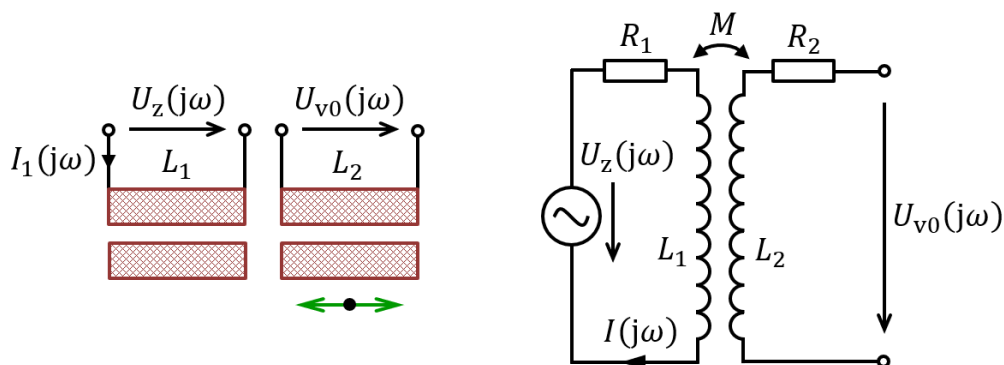
Principu vířivých proudů využívá také **lineární indukční senzor polohy FLDT** (Fast Linear Displacement Transducer) jehož schéma je na obr. 55. Jeho základem je válcová cívka s feritovým pláštěm, do níž se zasouvá jádro ve formě hliníkové trubičky spojené s měřeným objektem. Buzení cívky je střídavým proudem o frekvenci okolo 100 kHz. Vzniklé vysokofrekvenční elektromagnetické pole ve vnitřní vrstvě vyvolává vířivé proudy. Indukčnost závisí jen na části cívky v níž se nenachází hliníková trubička, resp. na té části cívky, kde je volné magnetické pole (Maixner, 2004).



Obr. 55 – Základní princip FLDT snímače, zdroj autor dle (Maixner, 2006)

3.2.4 Bez feromagnetika

Snímače bez feromagnetika se skládají ze dvou, v diferenciálním zapojení pak ze třech cívek s možností vzájemného pohybu. Princip je založen na indukci napětí na základě magnetické vazby dvou obvodů, viz obr. 56.



Obr. 56 – Indukční snímač bez feromagnetika: uspořádání a náhradní obvod, zdroj autor

Na základě náhradního obvodu (obr. 56 vpravo), za předpokladu, že $\omega L_1 \gg R_1$ lze výstupní napětí naprázdno postupně odvodit

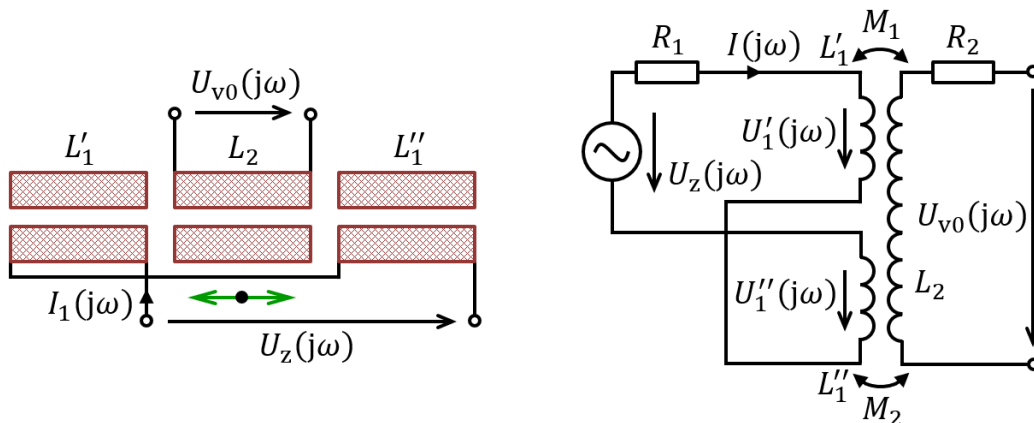
$$U_{v0} = j\omega M I_1 = j\omega M \frac{U_z}{j\omega L_1} = U_z \frac{k\sqrt{L_1 L_2}}{L_1} = U_z k \sqrt{L_1/L_2} \quad (12)$$

kde $k \in \langle 0, 1 \rangle$ je činitel vazby, který je závislý na vzájemné poloze cívek a na příslušných rozptylových magnetických tocích.

Na obr. 57 je uvedeno schéma snímače bez feromagnetika s diferenciálním uspořádáním cívek. Základem je zapojení shodných cívek L'_1 a L''_1 s počátky vinutí proti sobě a tedy se shodnými napětími $U'_1 = U''_1 = 1/2 U_z$. Intenzita výsledného magnetického pole je v místě roviny souměrnosti pak nulová. Dojde-li k posunutí cívky L_2 ze střední polohy mezi bočními cívkami, indukuje se v této cívce napětí

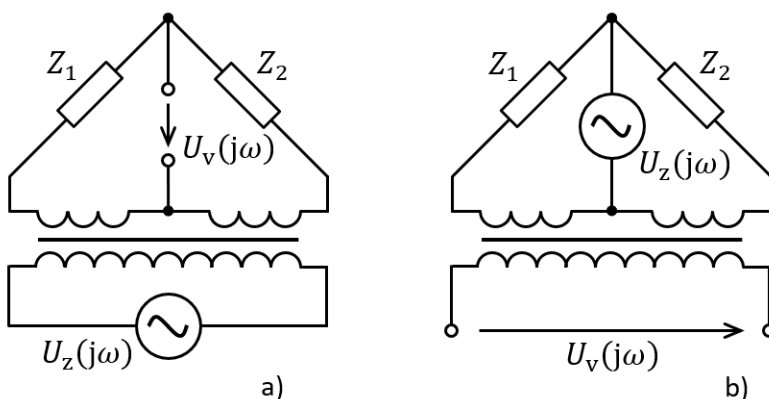
$$U_{v0} = U_z \left(\frac{M_1}{L'_1} - \frac{M_2}{L''_1} \right) \quad (13)$$

Napětí U_{v0} je v omezeném rozsahu lineární funkcí posunu.

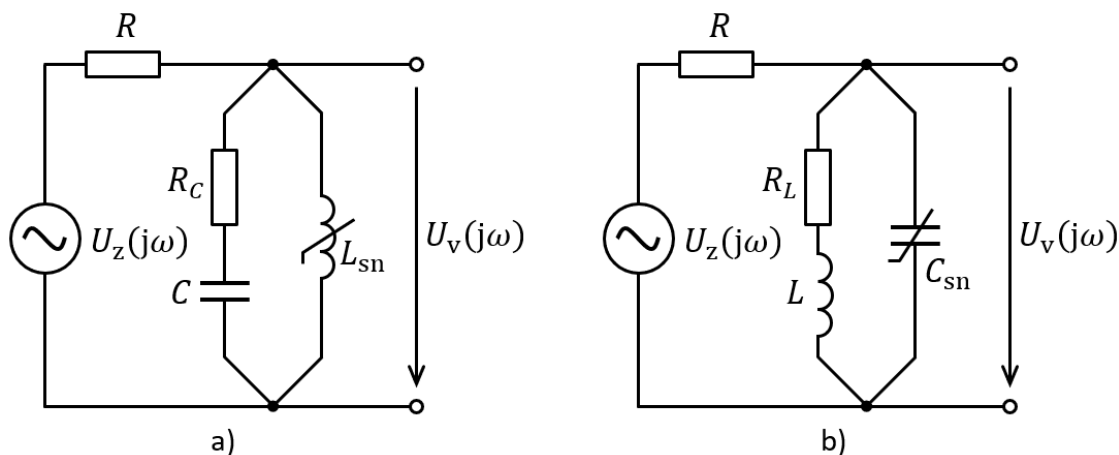


Obr. 57 – Diferenciální indukčnostní snímač bez feromagnetika: uspořádání a náhradní obvod, zdroj autor

Snímače v diferenciálním zapojení se nejčastěji zapojují jako součást měřicího můstku se střídavým napájením. Může být také použit tzv. transformátorový můstek (obr. 58), nebo rezonanční obvod (obr. 59). Varianta b) vyhodnocovacího rezonančního obvodu na obr. 59 je vhodná pro použití s kapacitními snímači probíranými dále v textu.



Obr. 58 – Možná zapojení transformátorových můstků, zdroj autor dle (Beneš, 2014)



Obr. 59 – Schéma rezonančních obvodů pro vyhodnocování změny: a) indukčnosti, b) kapacity, zdroj autor

3.3 Indukční

Polohu (příp. rychlost nebo zrychlení) lze na základě Faradayova indukčního zákona

$$u_{\text{in}} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (14)$$

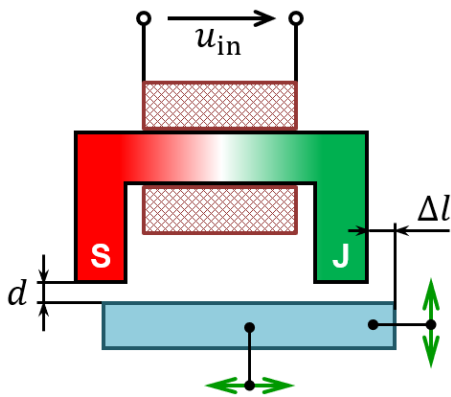
určovat dle typu snímače (Beneš, 2014):

- **elektromagnetický snímač** (s pohyblivým magnetem) – na základě časové změny magnetického toku $d\Phi/dt$ vyvolaného pevnou cívkou s N závitů;
- **elektrodynamický snímač** (s pohyblivou cívkou) – na základě změny počtu závitů N cívky vázaných stálým magnetickým tokem Φ .

Oproti výše popisovaným pasivním indukčnostním snímačům jsou snímače indukční (někdy též induktivní) aktivní, neboť vlivem pohybu dochází na základě jednoho ze dvou uvedených principů k indukování napětí úměrného výchylce. Nevyžadují tedy napájení, mají velmi jednoduchou konstrukci a využívají se i při měření rychlosti.

3.3.1 Elektromagnetické

Schéma uspořádání elektromagnetického snímače vyhodnocujícího změnu magnetického toku prostřednictvím změny impedance magnetického obvodu je na obr. 60. Jádru snímací cívky je tvořené permanentním magnetem, který generuje magnetické pole ovlivněné pohybem kotvy z feromagnetického materiálu spojené s měřeným objektem. Výsledné napětí snímací cívky je určeno změnou magnetického toku Φ ovlivňovaného proměnlivou reluktancí (magnetickým odporem) vzduchové mezery (Beneš, 2014). Změna reluktance nastává vlivem změny délky nebo plochy (průřezu) vzduchové mezery (viz obr. 60).



Obr. 60 – Princip elektromagnetického indukčního snímače polohy, zdroj autor

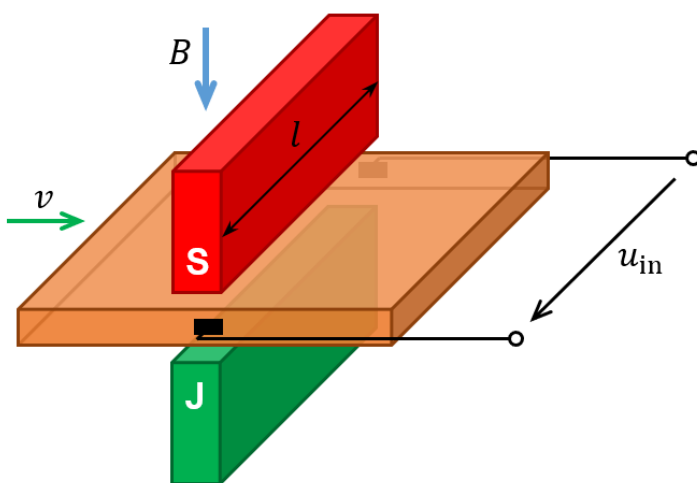
3.3.2 Elektrodynamické

Princip elektrodynamického snímače založeného na změně velikosti napětí v závislosti na rychlosti pohybu vodiče (cívky) v magnetickém poli dle vztahu (15) je na obr. 61. Bude-li se pohybovat pás z vodivého materiálu o šířce l v magnetickém poli s indukcí B rychlostí v , bude pak mezi kontakty na bocích pásu možné indikovat napětí

$$u_{in} = B l v \quad (15)$$

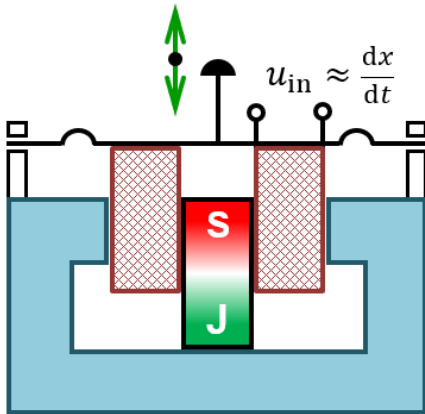
Vlivem působení magnetického pole buzeného permanentním magnetem (obr. 61) nebo budicí cívkou se totiž ve feromagnetickém materiálu pásu tvoří vířivé proudy. V důsledku toho se mezi kontakty vytvoří fiktivní vodivé vlákno napříč pásem a na připojených svorkách se objeví napětí u_{in} úměrné rychlosti pohybu pásu.

Zmiňovaný princip se používá např. u elektrodynamického snímače kmitů na obr. 62. Na pružné membráně umístěné ve vzduchové mezeře magnetického obvodu je cívka, na níž jsou přenášeny kmitů (obvykle v pásmu 1 Hz až 3 kHz, viz Beneš, 2014). Indukované napětí je pak úměrné rychlosti pohybu cívky. Výchylka snímaných kmitů se vypočte integrací, zrychlení derivací.



Obr. 61 – Princip elektrodynamického indukčního snímače polohy, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Mezi výhody elektrodynamických indukčních snímačů patří především jejich jednoduchá a robustní konstrukce a z toho plynoucí minimální nároky na údržbu. Další výhodou je jejich teplotní a časová stálost. Jejich živostnost je prakticky neomezená a navíc jsou vhodné k nasazení i do těžkých provozů s výrazným tepelným zatížením.



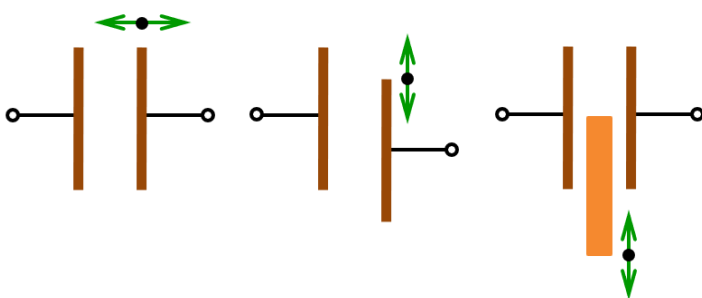
Obr. 62 – Schéma uspořádání elektrodynamického snímače kmitů, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

3.4 Kapacitní

Posuvný pohyb je transformován na změnu velikosti vzduchové mezery, změnu ploch elektrod nebo změnu permitivity, viz vysvětlení principu na obr. 63 a vztah (16) pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (16)$$

Základem snímače je tedy dvoj- nebo víceelektrodový systém – kondenzátor s proměnlivými parametry měnícími se vlivem změny polohy. V důsledku toho se mění kapacita.



Obr. 63 – K principu kapacitního snímače, zdroj: autor

Dle způsobu provedení je změna kapacity buď lineární (v určitém rozsahu, při změně plochy desek nebo při změně permitivity), nebo nelineární (při změně vzdálenosti desek). Nevýhodou je, že kapacitní snímače jsou použitelné jen pro velmi malé posuvy. Nutností jsou složitější následné obvody pro úpravu signálu, které jsou buď integrovány přímo v senzoru nebo jsou externí, ale dodávají se v kompletu se senzorem. Snímače jsou k dispozici v lineárním provedení, omezeně i v rotačním. Snímané délky mohou být od jednotek mm až cca 10 mm (Kupka, 2022).

Výhodou kapacitních snímačů je možnost jejich použití pro vysoké rychlosti a zrychlení pohybu. Jsou ve svém principiálním provedení bezkontaktní (pohyb je bez tření, bez síly, ale nejedná se samozřejmě o bezkontaktní měření), velmi odolné proti vlivům prostředí a mají prakticky neomezenou životnost.

Mimo základních konfigurací snímačů na obr. 63 se realizují v kapacitních senzorech i jiné varianty, např. diferenciální, se složeným dielektrikem a jejich různé vzájemné kombinace, které mají přímý vliv na průběh statické převodní charakteristiky snímače. Přehled základních typů kapacitních snímačů včetně příslušných charakteristik je uveden v tab. 3.

Tab. 3 – Přehled základních typů kapacitních snímačů a jejich charakteristik, zdroj autor

Typ snímače	Schéma	Charakteristika
Deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		
Deskový diferenciální s proměnnou mezerou		
Deskový s vrstvou dielektrika a s proměnnou mezerou		
Deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika		
Deskový jednoduchý s proměnnou plochou překrytí		

Typ snímače	Schéma	Charakteristika
Deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí		
Deskový s proměnnou plochou překrytí dielektrika		
Válcový s proměnnou plochou překrytí		
Otočný diferenční s proměnnou plochou překrytí		

Kapacitní senzory polohy se spojitým výstupem v průmyslovém provedení pracují nejčastěji na bázi tzv. otevřeného kondenzátoru. Jeho princip byl vysvětlen již v kapitole 2.2.2 (schéma na obr. 7). Elektrostatické pole kondenzátoru je ovlivňováno sledovaným objektem a dochází tak vlivem změny permitivity ke změně jeho jmenovité kapacity.



Obr. 64 – Průmyslová provedení kapacitních senzorů s integrovanou elektronikou, zdroj (Balluff CZ, 2023b)

Průmyslová řešení mohou být buď s integrovanou elektronikou (viz např. senzory od spol. Balluff CZ na obr. 64), nebo častěji může jít o tzv. kapacitní snímací hlavy v nejrůznějších provedení (bez elektroniky) určené pro následně zapojené zesilovače (viz obr. 65). Ty se pak

zapojí k samostatnému modulu se zesilovačem, který může být umístěn mimo kritická prostředí.



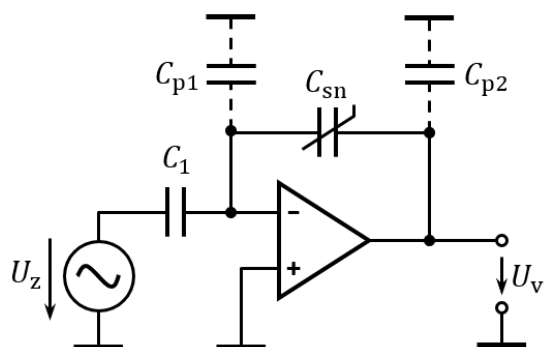
Obr. 65 – Různá provedení kapacitních snímacích hlav určených pro následně zapojené zesilovače, zdroj (Balluff CZ, 2023b)

Snímací hlavy mohou mít pouzdro vyrobené z ušlechtilé oceli, nebo z PTFE plastické hmoty. Mohou být určeny k líčující nebo nelíčující montáži, ve válcovém provedení s i bez závitů, s vyvedeným kabelem nebo s konektorem. K zesilovači, viz např. provedení od firmy Balluff CZ na obr. 66, se připojují pomocí kabeláže se speciálními konektory. Zesilovače obvykle disponují mimo analogových výstupů (napětových 0 až 10 V a/nebo proudových 4 až 20 mA) také programovatelnými spínacími, resp. rozpínacími výstupy (PNP nebo NPN), případně i výstupy speciálními (IO-Link).



Obr. 66 – Příklad průmyslového provedení následného zesilovače pro připojení kapacitních snímacích hlav, zdroj (Balluff CZ, 2023b)

Jako vyhodnocovací obvody se u kapacitních snímačů využívají především zesilovače se zpětnovazební měřicí kapacitou (viz obr. 67), měřicí můstky (viz kapitola 3.3 výše, obr. 58) a v případě detektorů přítomnosti také oscilátorové obvody (kapitola 3.3, obr. 59).



Obr. 67 – Kapacitní snímač ve zpětné vazbě integračního zesilovače, zdroj (Beneš, 2014)

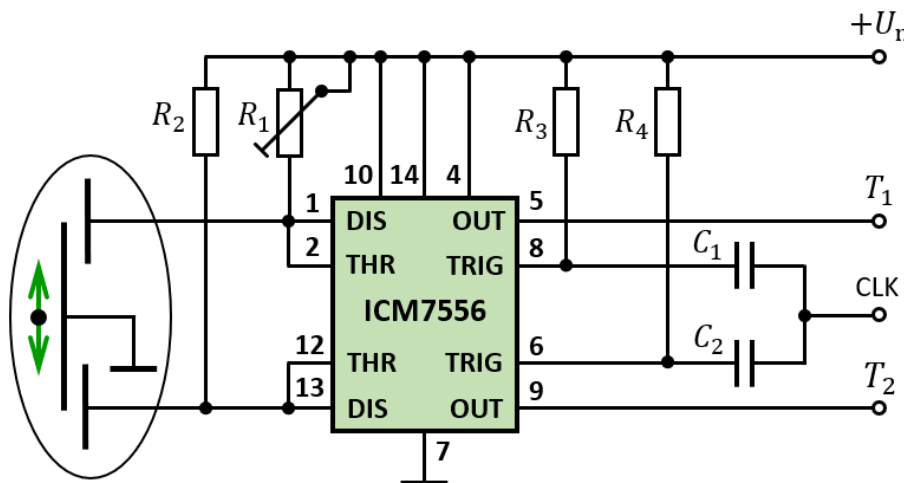
Kapacita je obecně definována jako $C = Q/U$, tedy jako podíl náboje vázaného mezi elektrodami, resp. vodiči, ku rozdílu potenciálů (napětí). Kapacita přírodního vedení se mění vlivem změn jeho polohy při měření a je tedy snahou minimalizovat jeho délku. Výhodou integrace snímače a vyhodnocovacího obvodu do jednoho celku je v případě zapojení na obr. 67 potlačení parazitních kapacit přívodů – C_{p1} k invertujícímu vstupu (virtuální nula) a C_{p2} k napětovému výstupu operačního zesilovače.

Výstupní napětí lze vyjádřit

$$U_v = -\frac{\frac{1}{j\omega C_{sn}}}{\frac{1}{j\omega C_1}} U_z = -\frac{C_1}{C_{sn}} U_z = -\frac{C_1 d}{\varepsilon S} U_z - K d U_z \quad (17)$$

Výstupní napětí U_v je dle vztahu (17) lineárně závislé na vzdálenosti elektrod kapacitního snímače. Při harmonickém buzení střídavým napětím U_z je na výstupu obvodu amplitudově modulované střídané napětí U_v s obálkou úměrnou časové změně vzdálenosti d , resp. výchylky x .

Další zajímavou možností je využití dvou monostabilních klopných obvodů spouštěných společným hodinovým signálem CLK, viz zapojení na obr. 68. K tomu lze využít např. integrovaný obvod ICM7556 se dvěma CMOS bipolárními časovači 556 s nízkou spotřebou energie 100 μ A a nízkým napájecím napětím 2 V. Střídavy výstupních signálů T_1 a T_2 jsou závislé na kapacitě příslušné části diferenciálního kondenzátoru. V návazném obvodu se navzájem odečtou a po filtraci (dolnofrekvenční propust) je výsledný signál pak úměrný střední hodnotě rozdílu a tím i poloze (Humlhans, 2005).



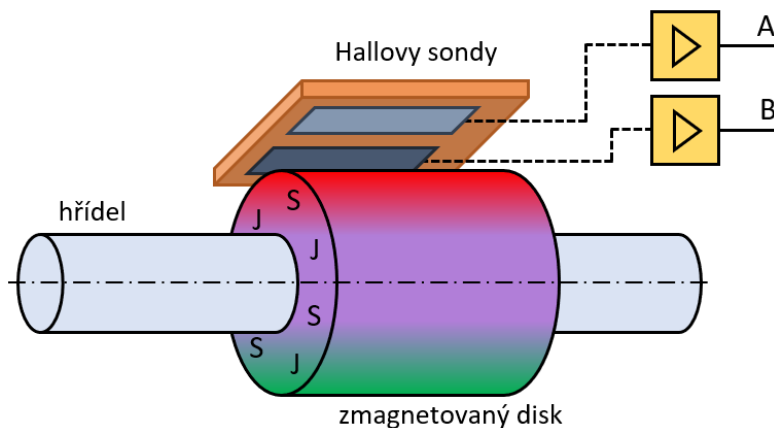
Obr. 68 – Zapojení s dvojicí MKO, zdroj autor dle (Humlhans, 2005)

3.5 Magnetické senzory

Jedná se o snímače rotačního nebo i translačního pohybu s nejčastěji číslicovým výstupem. Používané výrobní technologie nicméně umožňují v rámci integrace v jednom čipu, aby senzor poskytoval výstupní informaci v analogové i diskrétní (v inkrementální či absolutní) podobě.

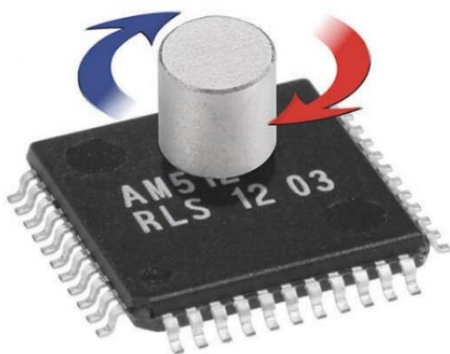
3.5.1 S Hallovými sondami

Pravděpodobně nejznámějším ze skupiny magnetických senzorů je senzor s Hallovými sondami. Princip zde využívaného Hallova jevu již byl vysvětlen v kapitole 2.2.5 (schéma viz obr. 14). Připomeňme, že pokud na element polovodiče, jímž prochází proud, působí normálové magnetické pole, objeví se na protilehlých bočních stranách elementu Hallovo napětí.



Obr. 69 – Schéma principu činnosti inkrementálního senzoru s Hallovými sondami, zdroj autor dle (Maixner, 2006)

Princip jednoduchého senzoru rotačního pohybu s Hallovými sondami je na obr. 69. Na výstupu sond je napětí, které je úměrné intenzitě měnícího se magnetického pole zmagnetovaného disku umístěného na otáčející se hřídeli. Signály ze sond jsou zpracovávány komparátory, takže výsledné signály mají obdélníkový průběh. Díky vzájemnému posunu o 90° lze určit směr otáčení. Vzhledem k malé velikosti zmagnetovaného disku a potřebě jím generovaného poměrně silného magnetického pole, je hustota impulzů omezena minimálními rozměry pólů na několik desítek na otáčku.



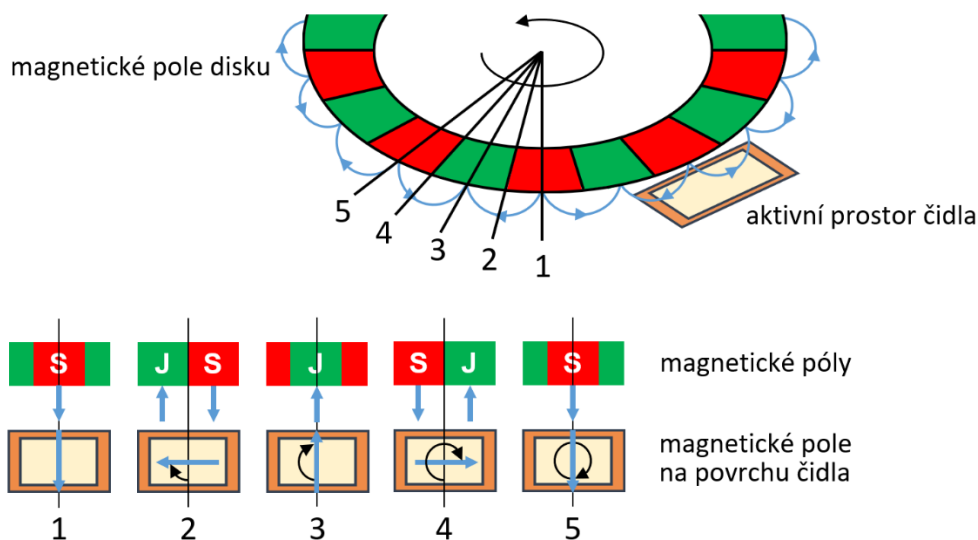
Obr. 70 – Snímací čip s maticí Hallových sond s inicializačním magnetem, zdroj (RLS, 2023)

Další typ senzoru, viz obr. 70, je tvořen čipem s integrovanou maticí Hallových sond citlivých na normálovou složku magnetického pole (tj. kolmou k povrchu čipu). Magnetické pole je buzeno malým dvou pólovým inicializačním permanentním magnetem. V závislosti na jeho rotaci dochází ke změnám magnetického toku a generování tomu úměrnému Hallovo napětí. Díky sofistikovanému návrhu matice Hallových sond integrované na čipu je vliv okolních

magnetických polí omezen a senzor tak může pracovat i v prostředí s magnetickým rušením vysoké úrovně (Beneš, 2014).

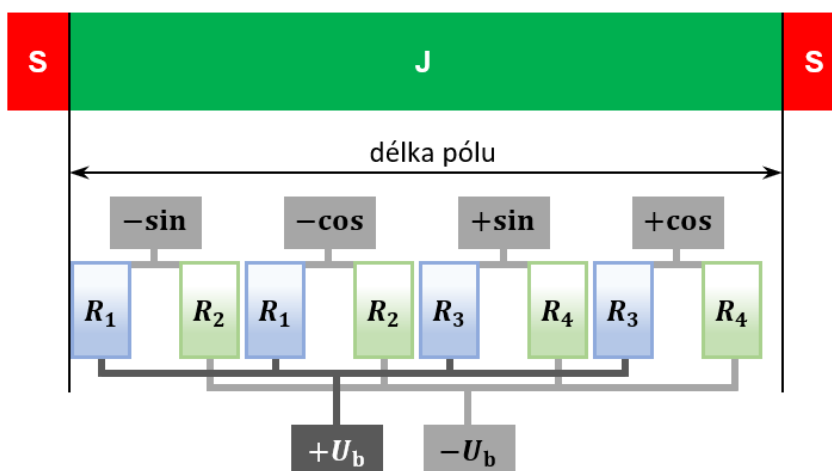
3.5.2 Magnetorezistivní

Základem magnetorezistivních senzorů jsou magnetorezistory, tj. feromagnetické nebo polovodičové prvky, jejichž odpor je závislý na velikosti magnetické indukce B .



Obr. 71 – Magnetické pole zmagetovaného disku, zdroj autor dle (Maixner, 2004)

V případě inkrementálního senzoru s číslicovým výstupem se využívá změny odporu v tenké vrstvě magnetorezistivního materiálu ze slitiny NiFe vyvolané změnou směru působení magnetického pole v němž je čidlo umístěno. Jde o pásek s anizotropní vrstvou o velmi malém průřezu $50 \text{ nm} \times 5 \text{ } \mu\text{m}$ s elektrickým odporem dostatečné velikosti nutným pro zpracování v navazujících obvodech. Hlavní výhodou je, že senzoru postačuje méně prostoru pro zástavbu než je nutné u senzorů s Hallovými sondami a ke své činnosti využívá jen slabé magnetického pole.



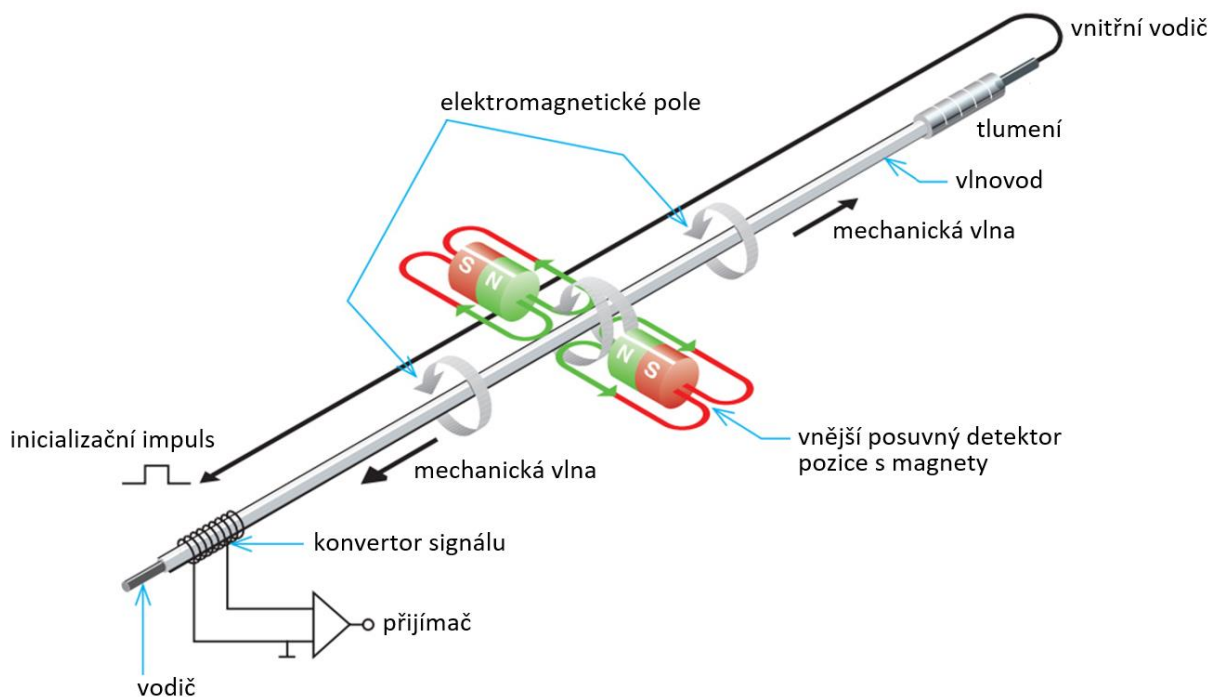
Obr. 72 – Schéma zapojení magnetorezistivních prvků do Wheatstoneova můstku, zdroj autor dle (Maixner, 2004)

Permanentní magnet ve tvaru kotouče se zmagnetovanými póly (16 až 64) na obr. 71 ovlivňuje odpor magnetorezistivního čidla v závislosti na druhé mocnině sinu úhlu mezi směrem toku proudu v pásku a směrem magnetického pole. Součástí citlivé části senzoru jsou dva pásy (dva fázově posunutá kanály a referenční signál). Teplotní závislost odporu měřicího pásku lze vyřešit zapojením čtyř pásků do Wheatstoneova můstku (Maixner, 2004), viz obr. 72.

Zmiňované senzory mohou být realizovány také v lineárním provedení. Používají se např. pro odměřování vysunutí pístnice pneumatického válce. Při posunu pístnice s magnetickými značkami se provádí snímání polohy s využitím dvojice magnetorezistorů.

3.6 Magnetostrikční

Princip činnosti senzoru, viz obr. 73, je založen na magnetomechanickém, přesněji magnetostrikčním Wiedemanově jevu, při kterém u magnetostrikčních (feromagnetických) materiálů umístěných v periodicky se měnícím magnetickém poli dochází ke změnám objemu materiálu (zkrutu válcové tyče) a tím ke vzniku nucených mechanických kmitů.



Obr. 73 – Schéma magnetostrikčního snímače polohy, upraveno dle (Rosenberger, 2023)

Základem je generování torzních kmitů vlnovodu pomocí vysokofrekvenčního pulzního signálu. Proudový impuls ve vodiči vedeném uvnitř vlnovodu v podobě trubky ze speciálního materiálu vyvolá okolo vodiče kruhové magnetické pole. V místě, kde se toto pole protne s polem generovaným vnějším permanentním magnetem umístěným ve snímacím prvku, dojde k mechanické deformaci o velikosti v rozsahu mikrometrů. Ta se šíří vlnovodem oběma směry k jeho okrajům ultrazvukovou rychlostí 2830 m/s a je nezávislá na okolních vlivech (změny teploty, vibrace atp.). Na jedné straně vlnovodu je deformace nejčastěji zatlumena a na druhé je detekována snímačem. Alternativně může být místo zatlumení mechanická vlna odražena směrem k detektoru za účelem dalšího zpřesnění. Měří se časová prodleva mezi

inicializačním proudovým impulzem a detekcí torzních kmitů, která je přímo úměrná poloze snímacího prvku a tedy i měřené poloze. Detektor pracuje na obráceném magnetostrikčním, tzv. Villariho megnetoelastickém jevu, při němž dochází ke změnám magnetických vlastností vlnovodu.

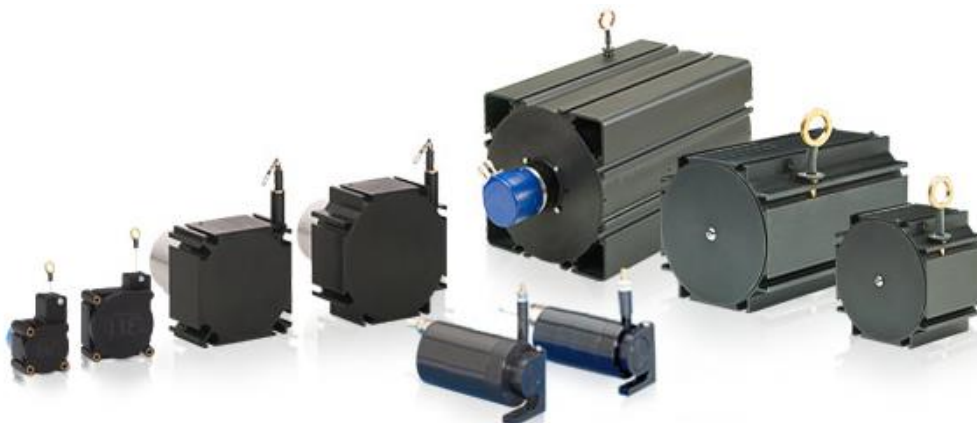
Výhodou je bezkontaktní provedení, kdy mezi posuvným snímacím prvkem a vlnovodem není žádná mechanická vazba. Sensory jsou vyráběny ve dvou základních provedeních – s tyčovou a profilovou konstrukcí, viz průmyslové senzory na obr. 74, s integrovanou elektronikou v několika variantách ochranného pouzdra. Používají se k měření polohy v hydraulických válcích, u portálových manipulátorů, v průmyslové výrobě, např. u tvářecích a válcovacích zařízení a u lisů a vstřikovacích strojů, ale i ve zdvihací a výtahové technice (Balluff, 2023c). Tyto senzory v dnešní době často nahrazují LVDT snímače.



Obr. 74 – Průmyslová provedení magnetostrikčních sensorů s konstrukcí: tyčovou (vlevo) a profilovou (vpravo), zdroj (Balluff, 2023c)

3.7 Lankové

Princip lankových sensorů je založen na měření lineárního pohybu (polohy) s využitím vysoce flexibilního ocelového lanka. Lineární pohyb vyvozený měřeným objektem je převáděn na rotační pohyb bubínku, na který se navíjí lanko. Rotační pohyb se pak měří pomocí potenciometrického snímače nebo pomocí enkodéru a následně převádí na výstupní signál senzoru.



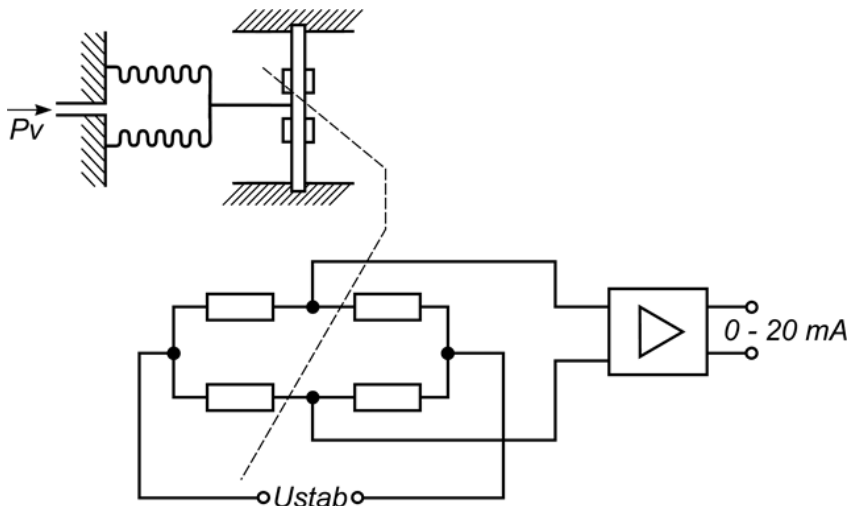
Obr. 75 – Různá provedení lankových snímačů, zdroj (Micro-epsilon, 2023b)

Největší výhodou při využití lankových senzorů je možnost použití kladek a tím odklonění dráhy lanka a umožnění měření na obtížně dostupných místech. Sensory, viz obr. 75, jsou spolehlivé, vykazují dlouhodobou životnost a lze je použít pro měření v rozsahu od 50 mm až do 50 m. Jsou vhodné především pro aplikace dle zákaznických požadavků (OEM) v medicínském prostředí, v automotive i jinde v průmyslu a pro použití u výtahů a dopravníků. Mohou mít jak analogový, tak i digitální výstup (Micro-epsilon, 2023b).

3.8 Tekutinové

Princip těchto senzorů je založen na změně tlaku v trysce nad měřeným objektem. Sensory pracují bez mechanického kontaktu a mezi jejich hlavní výhody lze řadit kompaktní rozměry a jednoduchou montáž. Snímací tryska senzoru může být přímou součástí efektoru průmyslového manipulátoru.

Základem snímací funkce je převod tlaku na vzdálenost. Napájení převodníku je realizováno v rozsahu 0,6 až 1 MPa, tedy je možné z běžných tlakových rozvodů dostupných v dílnách, průmyslových provozech, v laboratořích i ve vozidlech. Tlak je dále před vstupem do snímací části senzoru s využitím přesného redukčního ventilu upraven a stabilizován na 150 kPa. K trysce a citlivé části je paralelně připojen převodník tlaku na elektrický signál, jehož princip je uveden na obr. 76. Převodní charakteristika tlak / vzdálenost trysky od povrchu měřeného objektu je až do cca 0,3 mm lineární. Reálné použití tekutinových senzorů polohy je jen pro měření velmi malých vzdáleností, prakticky v řádech mikrometrů.



Obr. 76 – Schéma pneumato-elektrického převodníku s tenzometrickým můstkem, zdroj (VŠCHT, b. r.)

4 Otázky a úkoly

- 1) Co jsou a jaké uplatnění nacházejí detektory přítomnosti? Vysvětlete, co znamená značení jejich výstupů PNP/NPN NO/NC.
- 2) Jaké jsou základní typy optických závor? Kde se nejčastěji používají?

- 3) Je detekční rozsah ultrazvukových senzorů přibližně nějak omezen? Čím je případné omezení způsobeno?
- 4) Proveďte rozdělení indukčních senzorů polohy. Načrtněte možné průběhy statických charakteristik základních typů indukčních snímačů.
- 5) Co je základem funkce kapacitních senzorů polohy? Načrtněte možné průběhy statických charakteristik základních typů kapacitních snímačů.

5 Použitá literatura

ÁLAVA INGENIEROS, 2023. Sensores de desplazamiento inductivo o LVDT [online]. [citováno 14. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/instrumentacion-y-ensayos/sensores-y-calibracion/sensores-y-acondicionadores-de-senal/desplazamiento/sensores-de-desplazamiento-lvdt/fotos/>

AMCI, Inc., 2023. Resolver Sensors: Brushless resolver sensors & resolver transducers [online]. [citováno 15. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.amci.com/plc-automation-products/position-sensing/rotary-sensors/resolver-sensors/>

DIGI-KEY ELECTRONICS, 2023. Position, Proximity, Speed (Modules) – Industrial [online]. [citováno 1. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.digikey.in/en/products/filter/position-proximity-speed-modules-industrial/1065>

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023a. Indukční distanční snímače [online]. [citováno 14. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.balluff.com/cs-cz/products/areas/A0001/groups/G0101/products/F01115>

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023b. Kapacitní snímače [online]. [citováno 6. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.balluff.com/cs-cz/products/areas/A0001/groups/G0102>

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023c. Magnetostrikční snímače [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.balluff.com/en-de/products/areas/A0001/groups/G0116>

BENEŠ, Pavel a kol., 2014. *Automatizace a automatizační technika (3. svazek): prostředky automatizační techniky*. 5. vyd. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-3747-5.

EDWIN HALDER, KG, 2023. Senzory polohy výkyvné, pneumatické [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.halder.com/cz/PM/Normovane-dily/Strojni-a-zajistovaci-prvky/Snimaci-systemy/Senzory-polohy-vykyvne-pneumaticke>

GUO, Meishan a Zhong Wu, 2019. Noise Reduction for High-Accuracy Automatic Calibration of Resolver Signals via DWT-SVD Based Filter. *Electronics*. **8**(5), 516, 16 s. ISSN 2079-9292. DOI 10.3390/electronics8050516.

HANS TURCK, GmbH & Co. KG, 2023. *Magnetoinduktivní senzory* [online]. [citováno 1. 3. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://www.turck.cz/cs/productgroup/Senzory/Magnetick%C3%A9%20senzory>>

HOTAŘ, Vlastimil, 2019. *Automatizace a robotizace ve strojírenství: přehled, principy a úloha senzorů v automatizaci 1* [online]. [Citováno 7. 2. 2023]. Liberec: TU, Fakulta strojní.

Dostupné z WWW: <<https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=437859>>

HUMLHANS, Jan, 2005. *Zajímavá zapojení 3. díl: inspirace konstruktérům*. Praha: BEN – technická literatura, 176 s. ISBN 978-80-7300-152-7.

KUPKA, Libor, 2022. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

LUFINKA, Aleš, 2022. *Snímače pro měření vzdálenosti a posuvu*. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec, TU.

MAIXNER, Ladislav a kol. 2006. *Mechatronika*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-1299-3.

MARTINEK, Radislav, 2004. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 200 s. ISBN 978-80-7300-114-4.

MEGATRON, s.r.o, 2023. *Potenciometrické snímače* [online]. [citováno 12. 3. 2023].

Dostupné z WWW: <<https://www.megatron.cz/kategorie/senzorika/linearni-snimace-polohy/potenciometricke-snimace>>

MICRO-EPSILON, 2023a. *Induktivní snímače a čidla (LVDT)* [online]. [citováno 14. 3. 2023].

Dostupné z WWW: <<https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/inductive-sensor-lvdt/>>

MICRO-EPSILON, 2023b. *Lankové snímače wireSensor* [online]. [citováno 19. 4. 2023].

Dostupné z WWW: <<https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/draw-wire-sensor/>>

ONPIRA CZ, 2023. *Koncový spínač / mikrospínač* [online]. [citováno 27. 12. 2022]. Dostupné

z WWW: <<https://www.onpira.cz/zbozi/koncovy-spinac-mikrospinac/>>

QIN, Haoye a Zhong Wu, 2019. Angle Tracking Observer with Improved Accuracy for Resolver-to-Digital Conversion. *Symmetry* **11**(11), 1347, 17 s. ISSN 2073-8994. DOI 10.3390/sym11111347.

RLS d.o.o., 2023. *AM512B: 9 bit Rotary Magnetic Encoder IC* [online]. [citováno 12. 4. 2023].

Dostupné z WWW: <<https://www.rls.si/eng/am512b-9-bit-rotary-magnetic-sensor-chip>>

ROSENBERGER, Scott, 2023. Benefits of Non-contact Linear Position Sensing Technology. In *Automation Insights* [online]. [citováno 19. 4. 2023]. Dostupné z WWW:

<<https://automation-insights.blog/2016/03/02/benefits-of-non-contact-linear-position-sensing-technology/>>

SICK AG, 2023a. *Indukční snímače* [online]. [citováno 28. 2. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.sick.com/cz/cs/indukcni-snimace/c/g253054?q=:Def_Type:ProductFamily>

SICK AG, 2023b. *Kapacitní snímače* [online]. [citováno 28. 2. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.sick.com/cz/cs/kapacitni-a-magneticke-detekcni-snimace/kapacitni-snimace/c/g201659>>

SICK AG, 2023c. *Magnetické snímače* [online]. [citováno 28. 2. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.sick.com/cz/cs/kapacitni-a-magneticke-detekcni-snimace/magneticke-snimace/c/g201656>>

SICK AG, 2023d. *Optoelektronické snímače* [online]. [citováno 9. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.sick.com/cz/cs/optoelektronicke-snimace/c/g172752?q=:Def_Type:Product>

SICK AG, 2023e. *Snímače měření vzdálenosti: doba letu ultrazvukového signálu* [online]. [citováno 9. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdalenosti/c/g132151?q=:Def_Type:Product>

SIKO, GmbH, 2023. *Geared potentiometer* [online]. [citováno 13. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.siko-global.com/en-de/products/rotoline-rotary-encoders/geared-potentiometer>>

ŠTURCEL, Ján, 2004. *Prvky riadiacich systémov: Merania neelektrických veličín*. Bratislava: STU. ISBN 80-227-2120-4.

SVOBODA, A., 2023. *Koncový spínač 20x jinak*. In *Drátek návody* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://navody.drateg.cz/technikuv-blog/o-koncovem-spinaci.html>>

TAMAGAWA SEIKI, Co. Ltd., 2017. *Brushless resolvers (Smartsyn)* [online]. [citováno 15. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.tamagawa-seiki.com/products/resolver-synchro/brushless-resolver-smartsyn.html>>

VOJÁČEK, Antonín, 2005a. *Kapacitní senzory přiblížení*. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005101001>>

VOJÁČEK, Antonín, 2005b. *Optické senzory přiblížení - obecný popis*. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005121901>>

VOJÁČEK, Antonín, 2005c. *Ultrazvukové senzory přiblížení*. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005110201>>

VOJÁČEK, Antonín, 2006a. *Aplikace pro indukční senzory s analog. výstupem*. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/view.php%3Fcisloclanku%3D200508310>>

VOJÁČEK, Antonín, 2006b. Jednocestné optické závory – dosah až 350 m. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 8. 3. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2006070101>>

VOJÁČEK, Antonín, 2014a. Bezkontaktní indukční snímače přiblížení - obecný popis. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 27. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>>

VOJÁČEK, Antonín, 2014b. Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení - obecný popis. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 28. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>>

VOJÁČEK, Antonín, 2017. Magnetické senzory přiblížení – 1. díl. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 27. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni.html>>

VOJÁČEK, Antonín, 2018. Magnetické senzory přiblížení – 2. díl. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 30. 1. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni-2-dil.html>>

VŠCHT v Praze. Měření tlaku. *Stránky ÚPŘT – Ústavu počítačové a řídicí techniky VŠCHT v Praze* [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm>>

Seznam zkratk

A/D	analogově digitální
AI	analog input (analogový vstup)
AO	analog output (analogový výstup)
BLDC	brush-less direct current (stejnoseměrný bez tření)
CLK	clock (hodinový puls)
CMOS	complementary meta-oxide-semiconductor
DC	direct current (stejnoseměrný)
DIFFER	diferenciální
EC	electronically commutated (elektronická komutace)
EXC	electronic cross connect (elektronické křížové propojení)
FLDT	fast linear displacement transducer (lineární indukčnostní senzor polohy)
IO	input-output (vstupně-výstupní)

IR	infrared (infračervený)
LC	indukčně-kapacitní
LED	light emitting diode (světlo emitující dioda)
LVDT	linear variable differential transformer (diferenciální transformátorový snímač)
MKO	monostabilní klopný obvod
NC	not connected (nezapojený) / normally closed
NO	normally open
NPN	typ bipolárního tranzistoru s uspořádáním polovodičů N-P-N
NRSE	non-referenced single ended (typ zapojení)
OEM	original equipment manufacturer (výrobce originálních dílů)
OSC	oscilátor
PTFE	polytetrafluorethylen (plastická hmota s obchodním názvem Teflon)
PNP	typ bipolárního tranzistoru s uspořádáním polovodičů P-N-P
RC	odporově-kapacitní
RDC	resolver-digital converter (převodník resolveru)
RSE	referenced single ended (typ zapojení)
ToF	time of flight (doba letu)

Rejstřík

Faradayův indukční zákon, 4, 44
 fázový rozkladač. viz resolver
 FLDT. viz lineární indukčnostní
 Hallovo napětí, 13, 14, 51
 Hallův element, 14
 Hallův jev, 1, 13
 kompenzace úbytku napětí, 28, 29
 LC oscilátor, 40
 LVDT. viz diferenciální transformátorový
 mechanický koncový spínač, 6
 monostabilní klopný obvod, 50
 odporová dráha, 26
 odporový dělič, 27
 operační zesilovač, 50
 potenciometr, 26, 27
 senzor
 s nespojitou funkcí, 5

- detektor přítomnosti, 1, 3, 7, 9
 - fotoelektrický, 16
 - jednocestná optická závora, 16, 17, 59
 - retroreflektivní optická závora, 16
 - retroreflektivní optický senzor, 16, 20, 21, 22, 23
 - difuzní, 21
 - divergentní, 21
 - energetický, 21
 - konvergentní, 21
 - s potlačeným popředím, 21
 - s potlačeným pozadím, 21
 - indukční, 7, 8, 9
 - kapacitní, 9, 10, 11
 - magnetický (Reedův), 11
 - magnetoindukční, 12, 13
 - s Hallovou sondou, 13
 - přímý, 14
 - s vychýlenou sondou, 15
 - ultrazvukový, 23
 - mechanický kontaktní, 3, 5
- se spojitou funkcí
 - indukční
 - elektrodynamický, 45, 46
 - elektromagnetický, 44
 - indukčnostní, 30, 32, 33
 - bez feromagnetika, 30, 42, 43
 - diferenciální transformátorový, 34
 - induktosyn, 39
 - lineární, 41, 60
 - resolver, 37, 38, 39, 56, 57, 58, 61
 - s otevřeným magnetickým obvodem, 30, 34
 - s potlačeným magnetickým polem (s vířivými proudy), 30, 40
 - s uzavřeným magnetickým obvodem, 30
 - tlumivkový, 3, 30, 31
 - s proměnnou délkou vzduchové mezery, 30, 31
 - s proměnnou plochou vzduchové mezery, 31, 32
 - transformátorový, 30
 - s hliníkovou trubicí, 35
 - s hrotem, 35
 - s volným jádrem, 35
 - kapacitní, 3, 9, 10, 46, 47, 48, 49, 50, 57, 58, 59
 - deskový diferenční, 47, 48
 - deskový jednoduchý, 47
 - otočný, 48
 - se složeným dielektrikem, 47
 - válcový, 48
 - lankový, 4, 55, 58

- magnetický, 51, 59, 60
 - magnetorezistivní, 4, 52
 - s Hallovy sondami, 51
- magnetostrickní, 4, 53, 54, 55, 57
- odporový, 26
 - lineární, 30
 - rotační, 30
- tekutinový, 5, 56
- transformátorový můstek, 43
- vířivý proud, 4, 12, 41

Měření neelektrických veličin

Téma 8: Měření polohy II a měření otáček

Studijní cíl

Ultrazvukové, optické a číslicové senzory polohy, principy IRC, ARC, elektrodynamických a stroboskopických senzorů otáček.

Doba nutná k nastudování

3 hodiny

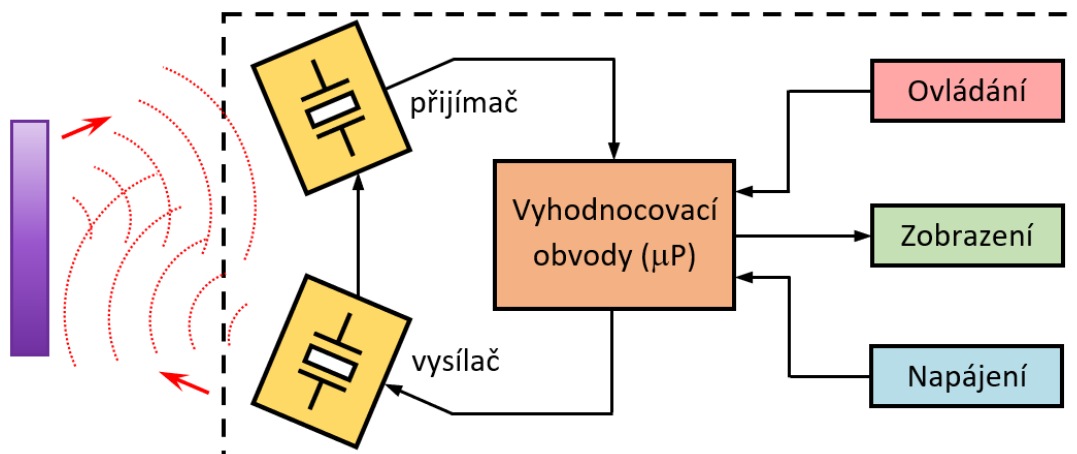
Klíčová slova

Poloha, otáčky, ultrazvukový senzor, time of flight, optický senzor, triangulace, IRC, ARC, Grayův kód, radar, tachodynamo, tachoalternátor, Hallova sonda, Wiegandův jev, vířivý proud, laser, stroboskop

1 Senzory polohy se spojitou funkcí

1.1 Ultrazvukové

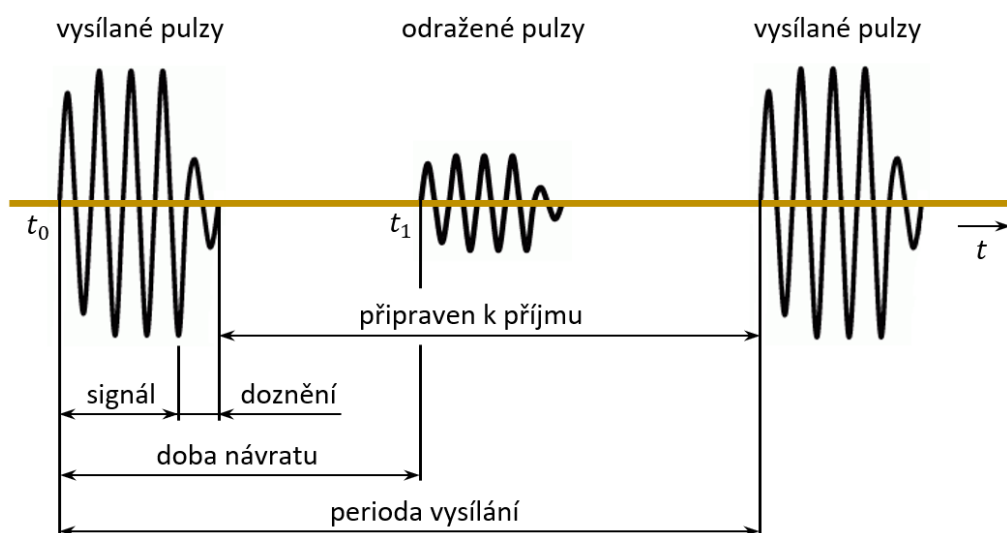
Princip funkce ultrazvukových senzorů byl již vysvětlen v bloku 7 – Měření polohy I, v kapitole 2.2.7 popisující ultrazvukové detektory přítomnosti. Na obr. 29 bylo uvedeno schéma ultrazvukového senzoru složeného z piezokeramického měniče s budicími a přijímacími obvody, vyhodnocovacích obvodů a výkonového koncového stupně. Princip činnosti ultrazvukového senzoru se spojitou funkcí je obdobný, blokové schéma senzoru je na obr. 1.



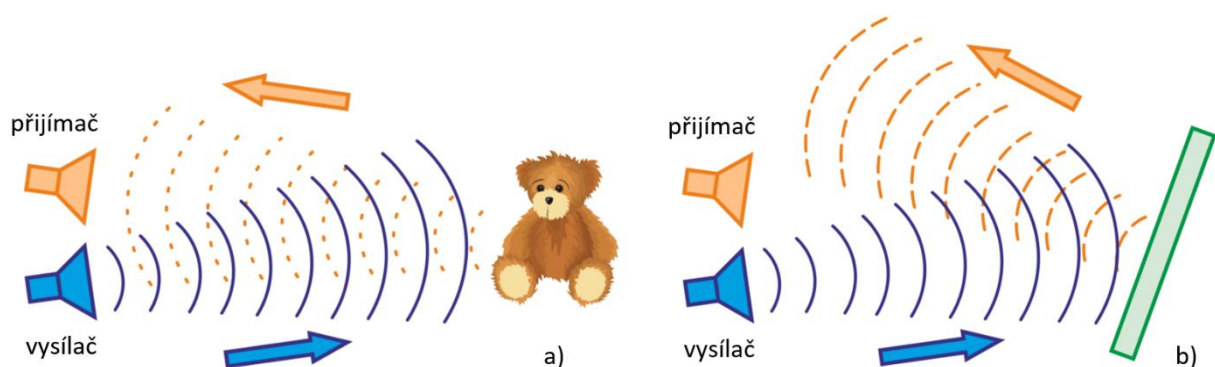
Obr. 1 – Blokové schéma ultrazvukového senzoru, zdroj autor dle (Beneš, 2014)

Jak již bylo uvedeno, tak k buzení měniče se používá pulzně spínaný oscilátor naladěný na rezonanční frekvenci piezoelektrického měniče (vysoké frekvence) nebo je příp. použit měnič magnetostrikční (nízké frekvence). Měnič vyše několik impulsů (tzv. krátkou dávkou) a ty se šíří rychlostí zvuku. Narazí-li na překážku, část vlnění se odrazí a vrátí se do senzoru, viz obr. 2. Vyhodnocovací obvody vypočítají z doby zpoždění $t_1 - t_0$ vzdálenost objektu. Nevýhodou je tzv. mrtvý čas, kdy měnič dokmitává, protože až poté může být detekována odezva. V důsledku toho se nachází u ultrazvukového senzoru tzv. mrtvá či slepá zóna, v rámci níž senzor neměří.

V praxi senzor v souladu s obr. 1 používá dva ultrazvukové měniče – jeden pro vysílání (vysílač, resp. reproduktor) a druhý pro příjem odraženého signálu (přijímač, resp. mikrofon). Činnost senzoru je řízena pomocí mikroprocesoru (blok vyhodnocovacích obvodů, realizace na bázi mikrokontroléru Atmel, PIC atp.). Přesnost měření je ovlivňována několika faktory. Rychlost ultrazvuku ve vzduchu se liší v závislosti na teplotě a vlhkosti. Problém bývá při měření vzdálenosti měkkého objektu, od kterého se ultrazvukové impulzy neodrazí, protože dojde k jejich významnému pohlcení, nebo objektu potočeného, od kterého se impulzy odrazí jiným směrem, viz obr. 3.



Obr. 2 – K principu ultrazvukového snímače, zdroj autor dle (Maixner, 2004) a (Vojáček, 2005)



Obr. 3 – Omezení použití ultrazvukových snímačů v případě: a) měkkých objektů, b) šikmých ploch, upraveno dle (RoboDoupě, 2018)

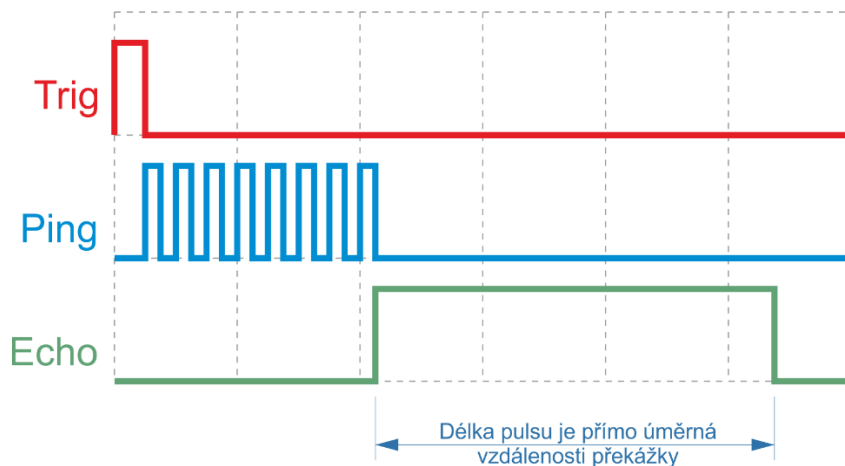


Obr. 4 – Průmyslová provedení ultrazvukových snímačů se spojitým výstupem, zdroj (Balluff, 2023c)

Na obr. 4 je několik standardních průmyslových provedení ultrazvukových senzorů se spojitým výstupem od spol. Balluff. Na obr. 5 je pak v současnosti velmi rozšířený levný ultrazvukový snímač Kitronik HC-SR04. Měření vzdálenosti se u toho senzoru spouští sestupnou hranou impulzu (viz obr. 6), který je přiveden na vstup označený jako Trig. Následně vyšle senzor několik impulzů ultrazvukového signálu (průběh signálu Ping na obr. 6) a na výstupu Echo se objeví logická jednička. Senzor současně čeká na příjem odraženého signálu. Jakmile dojde k jeho přijetí, objeví se na výstupu Echo logická nula. Délka takto vymezeného impulzu je přímo úměrná vzdálenosti měřeného objektu. Při výpočtu vzdálenosti se vychází ze skutečnosti, že rychlost šíření ultrazvuku ve vzduchu je přibližně 343 m/s a že signál urazí mezi snímačem a objektem dvojnásobnou vzdálenost (RoboDoupě, 2018).



Obr. 5 – Levný ultrazvukový snímač vzdálenosti Kitronik HC-SR04, zdroj (Kitronik, 2023)



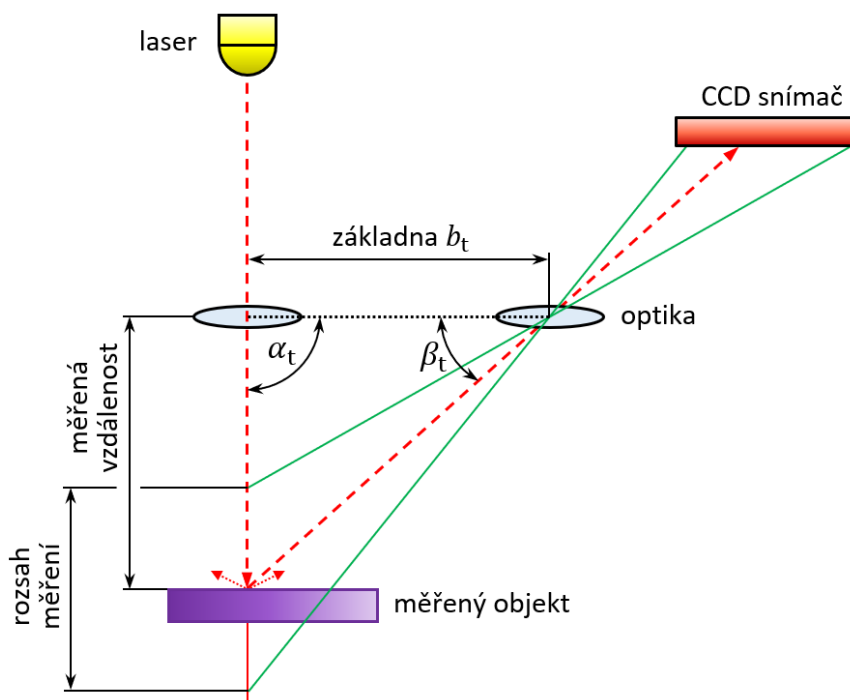
Obr. 6 – Průběh důležitých signálů ultrazvukového senzoru vzdálenosti, zdroj (RoboDoupě, 2018)

1.2 Optoelektrické

Optoelektrické senzory se používají k bezdotykovému měření vzdálenosti. Senzory mohou být miniaturních rozměrů při současně vysoké rozlišovací schopnosti v řádech μm , která je ale limitována jevy v souvislosti s ohybem světla. Patří mezi nejpoužívanější typy senzorů pro spojitě měření vzdálenosti používané v průmyslové praxi. Za další výhody lze považovat necitlivost na elektromagnetické pole, galvanické oddělení senzoru a měřeného objektu a možnost použití i v hořlavých či výbušných prostředích. Jako zdroje záření se stejně jako u optoelektrických (resp. fotoelektrických) detektorů používají LED nebo laserové diody a jako snímací prvky pak fotodiody, fototranzistory nebo CCD snímače.

1.2.1 Triangulační

Translační pohyb je převáděn na změnu úhlu odrazu paprsku od povrchu objektu, resp. na změnu polohy dopadu odraženého paprsku na CCD snímač, viz obr. 7. Zdroj světla, který emituje bodový laserový paprsek, vymezuje společně s vysvíceným bodem na měřeném objektu a bodem na CCD snímači triangulační trojúhelník. Základna tvořená spojnicí mezi zdrojem a snímačem představuje tzv. triangulační bázi s délkou b_t . Úhel α_t mezi emitovaným paprskem a základnou je konstantní, zatímco úhel β_t mezi odraženým paprskem a základnou odpovídá proměnné pozici bodu na CCD snímači a tím i vzdálenosti měřeného objektu.



Obr. 7 – K principu činnosti triangulačního snímače vzdálenosti, zdroj autor dle (Hotař, 2019)

Provedení senzorů je jen lineární pro měření délek od jednotek mm až po jednotky m. Výhodou je, že mají prakticky neomezenou životnost, měření je bezkontaktní. Mají standardní výstup 0 až 10 V nebo 4 až 20 mA, případně digitální. Potřebná elektronika je integrována přímo jako součást senzoru. Nevýhodou těchto snímačů je, že je nelze použít pro velké

rychlosti (omezení je způsobeno rychlostí detektoru), jsou málo odolné proti vlivům prostředí a při měření jsou kladeny speciální požadavky na povrch odrazivé plochy. (Kupka, 2022)

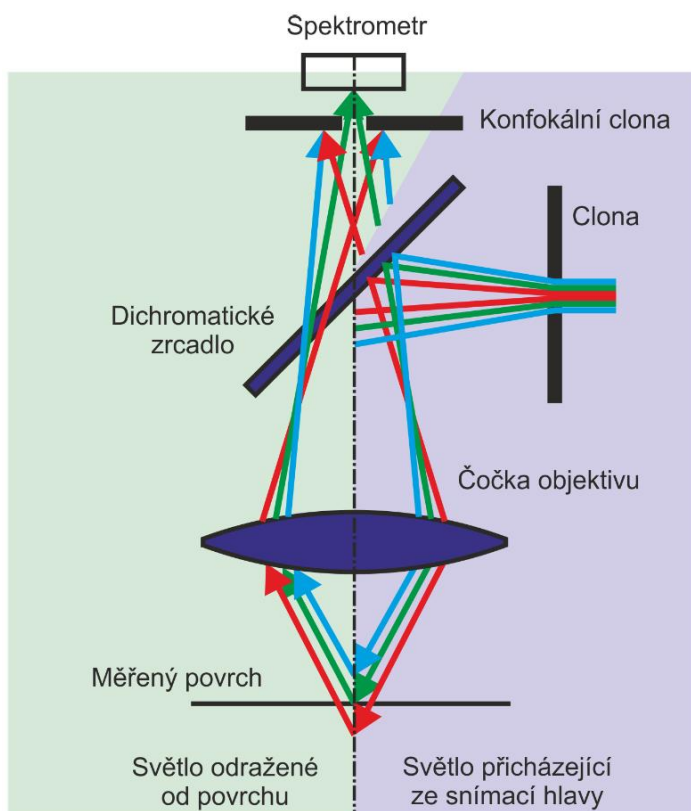


Obr. 8 – Průmyslová provedení optoelektronických triangulačních snímačů se spojitým výstupem, zdroj (Balluff, 2023b)

Na obr. 8 jsou průmyslová provedení optoelektronických senzorů Balluff pracujících na triangulačním principu.

1.2.2 Konfokálně chromatické

Posuvný pohyb je převáděn na detekci barvy odraženého světla. Paprsek vyslaný snímačem je rozložen na barevné spektrum, změnou polohy předmětu se zpět odráží jen některá barva. I tyto snímače jsou k dispozici jen v lineárním provedení pro bezkontaktní měření délek od 0,1 až do cca 50 mm.

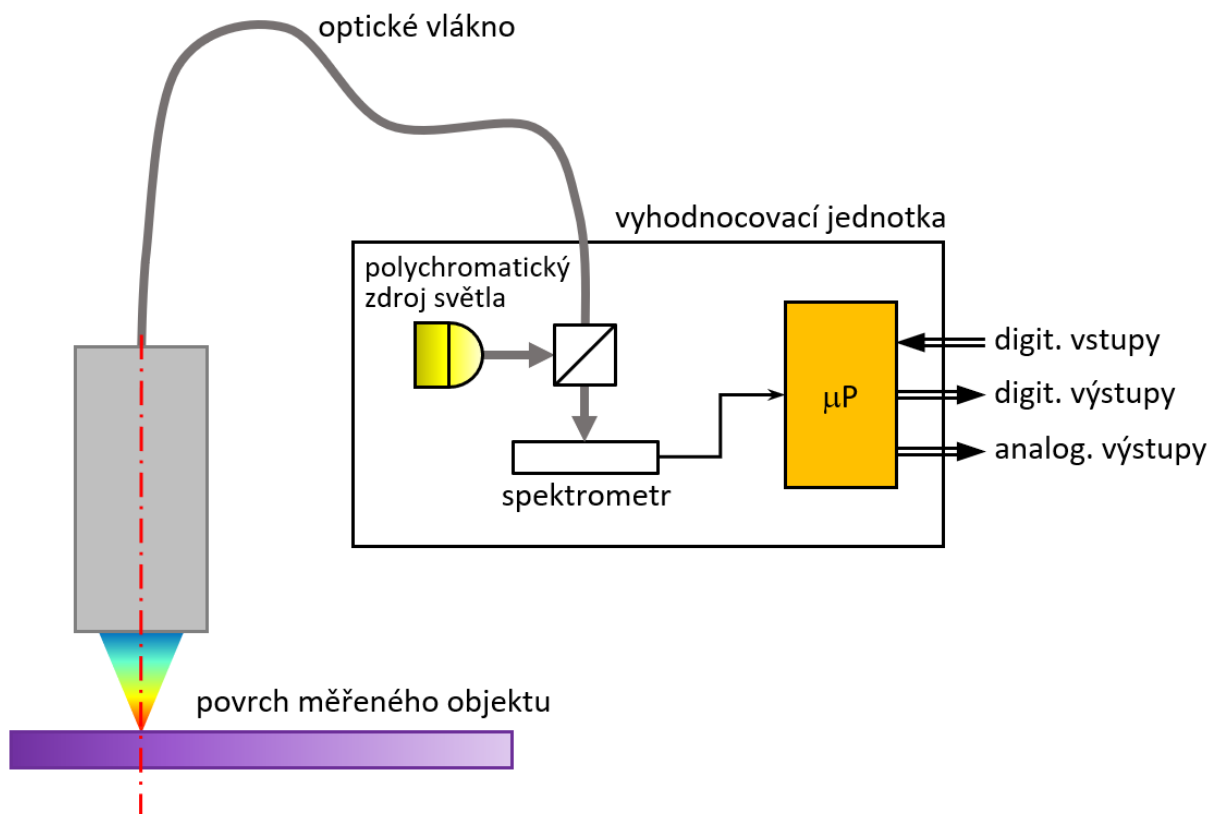


Obr. 9 – Schéma principu konfokálního snímače, zdroj (Hotař, 2019)

Stejně jako senzory triangulační, mají tyto senzory prakticky neomezenou životnost a mají standardní unifikovaný výstup 0 až 10 V nebo 4 až 20 mA, případně digitální. Potřebná elektronika může být integrována přímo v senzoru, nebo je oddělená, ale v kompletu se snímací hlavicí senzoru. Mezi jejich nevýhody patří vyšší cena, omezení měření na malé vzdálenosti, menší odolnost vůči vlivům prostředí a požadavky na povrch odrazivé plochy.

Princip činnosti konfokálního chromatického snímače je ilustrován na obr. 9. Senzor emituje směrem k měřenému objektu bílé světlo obsahující všechny složky (vlnové délky) viditelného VIS (380 až 780 nm) spektra elektromagnetického záření. Ve snímáči je viditelné světlo rozloženo na jednotlivé monochromatické složky s odpovídajícími vlnovými délkami. Ty jsou pomocí optické soustavy zaostřeny na různé vzdálenosti. Konkrétní monochromatická složka světla, která je zaostřena právě na povrch měřeného objektu (fokální body čočky) má bodovou reprezentaci a ostrý obraz odrážející se od povrchu. Další odražené monochromatické složky ostrý obraz nemají. Odražené světlo se vrací přes optický systém zpět do senzoru, v němž konfokální (bodová) clona zamezuje průchodu neostrých odražených složek, tj. složek z jiné než měřené roviny povrchu objektu. Na elektrooptický snímač (spektrometr) dopadá pouze barevná složka odražená od povrchu měřeného objektu. Detektor vyhodnocuje vlnovou délku a přepočtem ve vyhodnocovací jednotce pak dochází ke stanovení vzdálenosti objektu.

Senzor je často také tvořen snímací hlavicí spojenou světlovodným vláknem se samostatnou vyhodnocovací jednotkou, viz schéma uspořádání na obr. 10. Senzory mají běžně analogové i digitální výstupy. Na obr. 11 jsou příklady průmyslových senzorů od společnosti Mikro-epsilon.



Obr. 10 – Schéma uspořádání konfokálně chromatického senzoru, zdroj autor dle (Hotař, 2019)



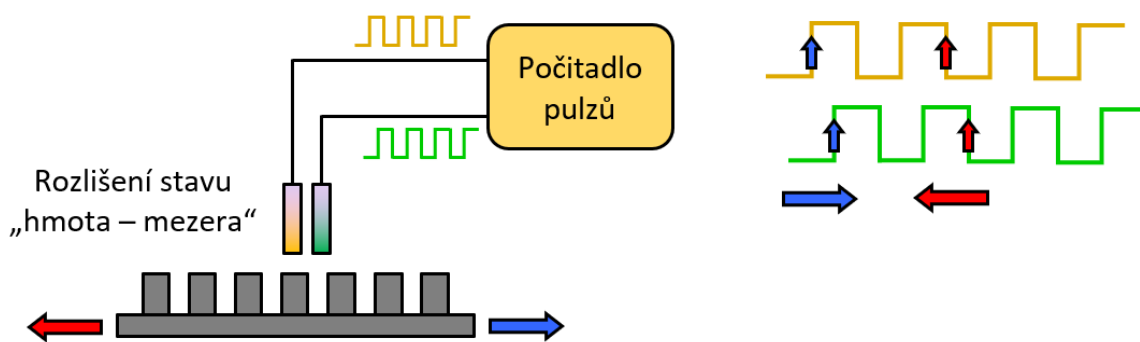
Obr. 11 – Různá provedení průmyslových konfokálně chromatických senzorů, zdroj (Micro-epsilon, 2023)

1.3 Číslicové

Číslicové senzory polohy poskytují na výstupu přímo číslicovou informaci odpovídající měřené poloze. Primárně se dělí na senzory relativní (inkrementální) a absolutní. Založeny mohou být na mechanickém, optickém nebo magnetickém principu.

1.3.1 Inkrementální

Posuvný pohyb je u inkrementálních číslicových senzorů, tzv. enkodérů, převáděn na impulsy, které se počítají. Snímač může být založen na mechanickém, optickém, magnetickém nebo i kapacitním principu. Provedení může být lineární i rotační. Zjednodušeně lze funkci vysvětlit pomocí obr. 12, v tomto případě se jedná o lineární (translační) pohyb. Používají se dvě čidla navzájem posunutá o polovinu šířky „zubu“ (resp. o čtvrtinu periody). Podle posunutí signálů lze pak rozlišit směr pohybu.

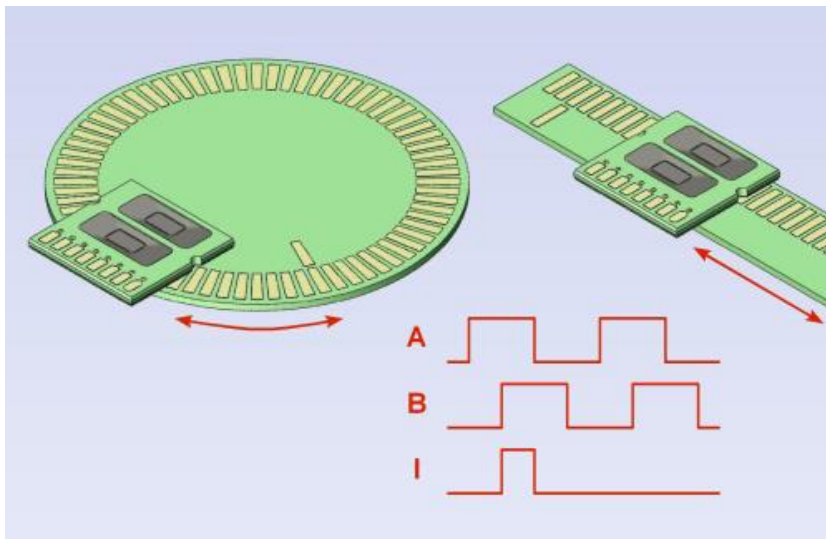


Obr. 12 – Základní princip inkrementálního snímače polohy, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)

Po zapnutí nelze zjistit absolutní polohu, inkrementální senzory jsou relativní, resp. cyklicky absolutní. Problém se řeší pomocí dalšího čidla a nulové značky. Pro určení polohy je pak na začátku nutné provést nejprve posuv, až se detekuje nulová značka.

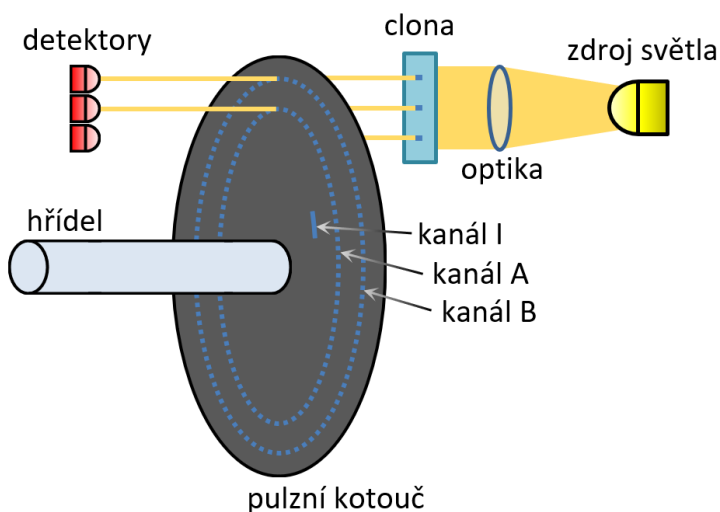
Základem praktické realizace senzoru je měřítko (jezdec) nebo kotouč (rotor) s laserem vytvořenými ryskami (optický záznam), nebo s magnetickým záznamem nebo s otvory s pravidelnou roztečí (jednotkový krok), viz např. obr. 13. Každá poloha je určena jistým počtem kroků (přírůstkem) z předcházející polohy. Signály jsou označeny A a B, nulová značka

I (index), někdy též N. Čítač pulzů poskytuje hodnotu vzhledem k počáteční poloze a při pohybu jedním směrem se pulzy přičítají, při pohybu opačným směrem se odečítají.



Obr. 13 – Realizace lineárního a rotačního inkrementálního snímače polohy, zdroj (Lufinka, 2012)

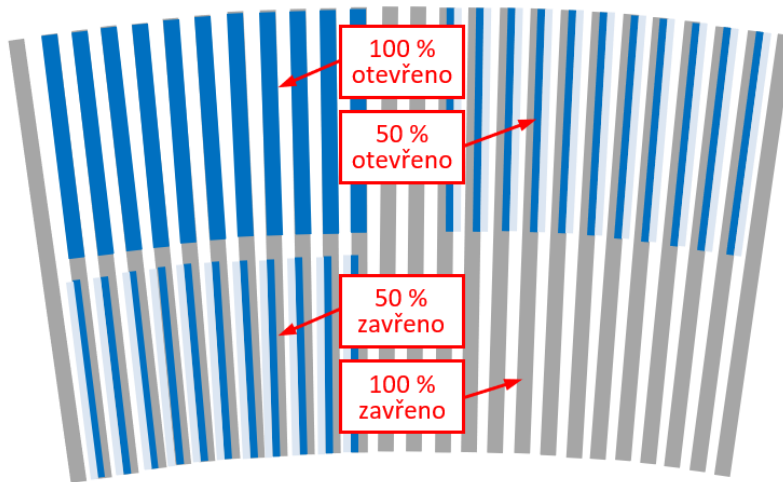
U optických enkodérů se nejčastěji světlo z vysoce výkonné LED diody rovnoměrně rozptýluje pomocí čočky a částečně prochází přes clonu a pulzní kotouč, viz obr. 14. Konstruktivní řešení je obvykle takové, že clona je součástí příruby a kotouč je na hřídeli vyrobené z nerezové oceli. Hřídel je s využitím speciálních ložisek prakticky bez vůlí. Při jejím otáčení se pak na základě kombinace apertur (velikostí otvorů v optické soustavě) clony a kotouče otevírají a zavírají definovaná pole v mřížce (obr. 15), resp. světlo mřížkou projde, projde částečně, nebo neprojde. Jak již bylo uvedeno, tak se detekují dva navzájem fázově posunuté signály o 90° a nulová značka. Detekce je prováděna zpravidla fototranzistory a po zpracování následnými elektronickými obvody je senzorem poskytován harmonický sinový nebo TTL (či tzv. HTL) obdélníkový pulzní signál a jejich invertované varianty.



Obr. 14 – Princip činnosti rotačního optického inkrementálního senzoru, zdroj autor dle (D-Ex, 2023)

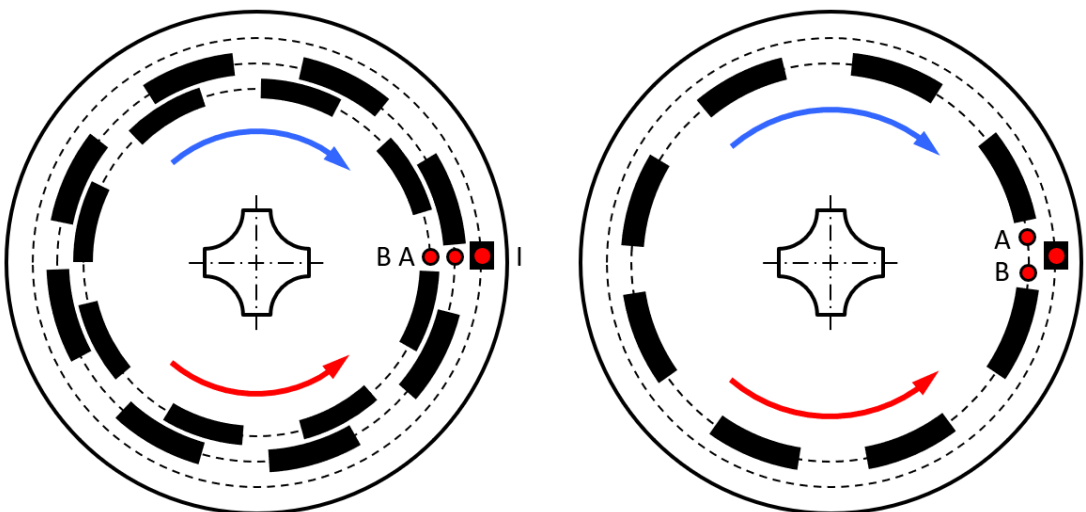
V případě magnetického enkodéru je na hřídeli uvnitř senzoru diametrálně polarizovaný permanentní magnet. Vlivem otočení hřídele dochází ke změně magnetického pole a ta je

detekována integrovanými Hallovými snímači. Další zpracování i výstup ze snímače jsou obdobné jako u optického senzoru.



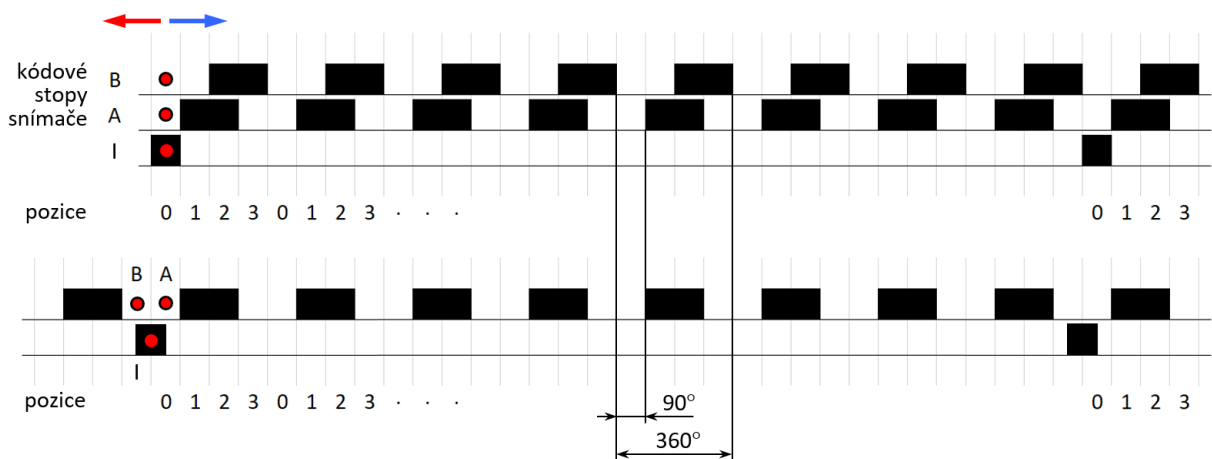
Obr. 15 – Apertura clony a pulzního kotouče, zdroj autor dle (D-Ex, 2023)

Základní princip kódování lze zjednodušeně popsat na schématu kotouče (obr. 16) a pravítka (obr. 17) se dvěma stopami (každá má svůj snímač), resp. s jednou stopou (dva snímače za sebou). Jednostopové varianty zjednodušeně vzniknou pootočením, resp. posunem jedné ze stop do shodné polohy s druhou stopou a protože pak jsou navzájem pootočený, resp. posunuty snímače, lze jednu ze stop zcela vypustit.

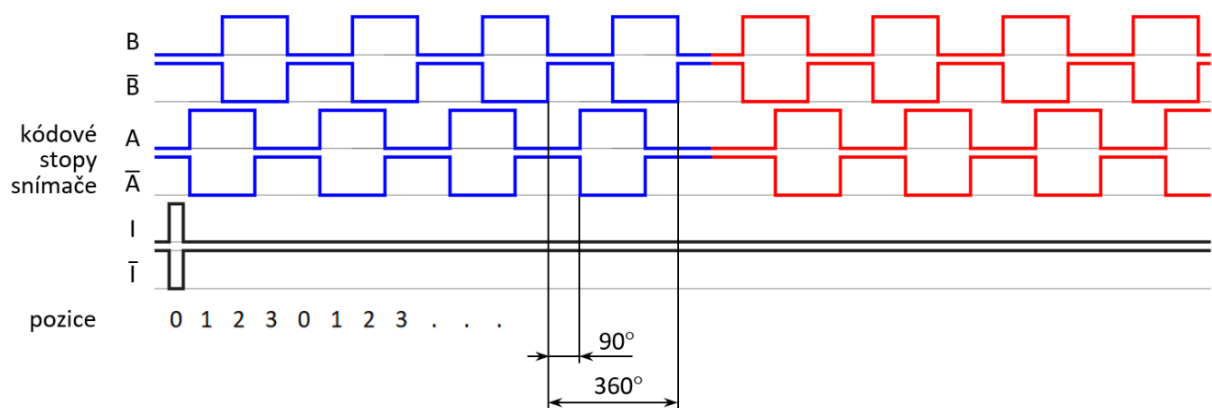


Obr. 16 – Provedení rotačního pulzního kotouče s nulovou značkou: se dvěma kódovými stopami (vlevo) a s jednou kódovou stopou (vpravo), zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023d)

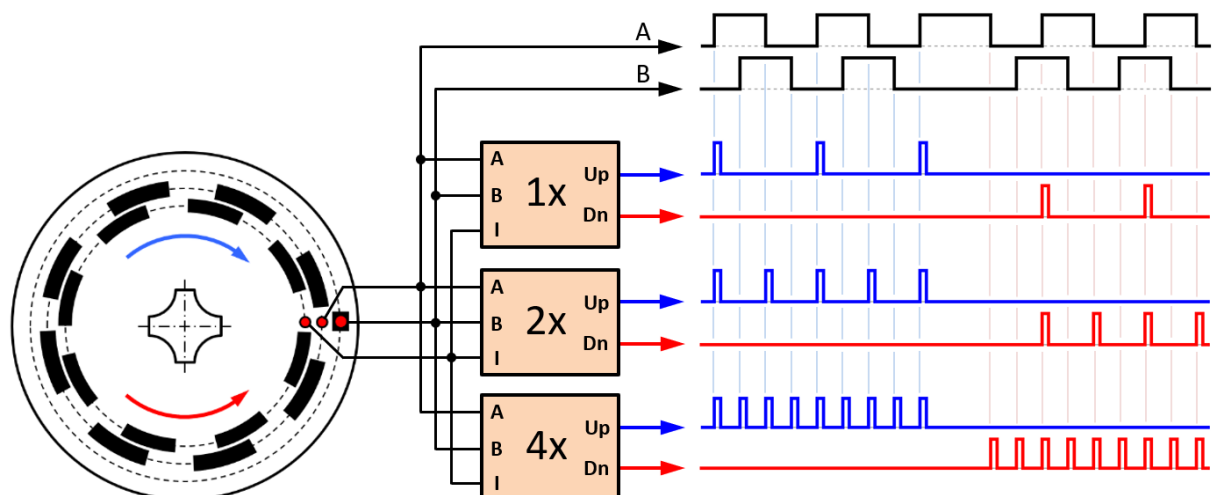
Průběh signálů A a B na obr. 18 odpovídá stavu jednotlivých stop na kotouči nebo na pravítku. Signály A a B jsou navzájem fázově posunuty o 90° , na základě čehož lze určit směr pohybu. Cyklus střídání signálů v ilustrovaném případě odpovídá maximálně čtyřem možným kombinacím označeným 0, 1, 2 a 3 – sekvence 00, 10, 11, 01 (modrá) při otáčení, resp. posunu jedním směrem a sekvence 00, 01, 11, 10 (červená) při otáčení nebo posunu směrem opačným. Jeden cyklus kódu tedy trvá 360° (pozor, neplést s otáčkou pulzního kotouče).



Obr. 17 – Provedení pravítka pro lineární inkrementální sensor s nulovou značkou: se dvěma kódovými stopami (nahore) a s jednou kódovou stopou (dole), zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023d)



Obr. 18 – Průběh signálů A, B, I a negovaných průběhů v obou směrech pohybu, zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023d)



Obr. 19 – Možnosti zpracování signálů s jednoduchým, dvojnásobným a čtyřnásobným vyhodnocováním, zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023d)

Výstupní signály z inkrementálního senzoru se po úpravě zpracovávají v souladu s obr. 19 v čítači inkrementů.

Vyhodnocování může být:

- a) **jednoduché** (single, 1x za cyklus kódu) – s náběžnou hranou signálu A se generuje puls, pro kladný směr na výstupu Up, pro záporný na výstupu Dn
- b) **dvojnásobné** (double, 2x za cyklus kódu) – puls se generuje s náběžnou i sestupnou hranou signálu A
- c) **čtyřnásobné** (quadruple, 4x za cyklus kódu) – puls se generuje s oběma hranami signálu A i signálu B

Inkrementální snímače se vyrábí pro měření v rozsahu od desítek mm až po jednotky m. Rozlišení a odolnost proti vlivům prostředí závisí na provedení snímače. Optické enkodéry mají vyšší přesnost než magnetické, ale mají složitější konstrukci a jsou více citlivé na okolní vlivy. Výstupem je po zpracování v senzoru integrovanými obvody přímo číslcová informace. Výhodou je téměř neomezená životnost senzorů a bezkontaktní měření. Přesnost nezávisí na rozsahu a z tohoto důvodu se neuvádí u snímačů jinak běžná relativní chyba. (Kupka, 2022)

Inkrementální rotační senzory polohy v průmyslovém provedení jsou na obr. 20. Na obr. 21 jsou pak inkrementální senzory lineární.



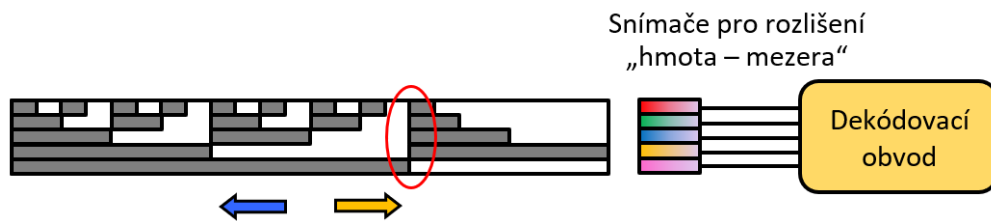
Obr. 20 – Různá průmyslová provedení inkrementálních rotačních senzorů polohy, zdroj (Opkon, 2023b) a (Larm, 2023)



Obr. 21 – Různá průmyslová provedení lineárních inkrementálních senzorů polohy, zdroj (Opkon, 2023a)

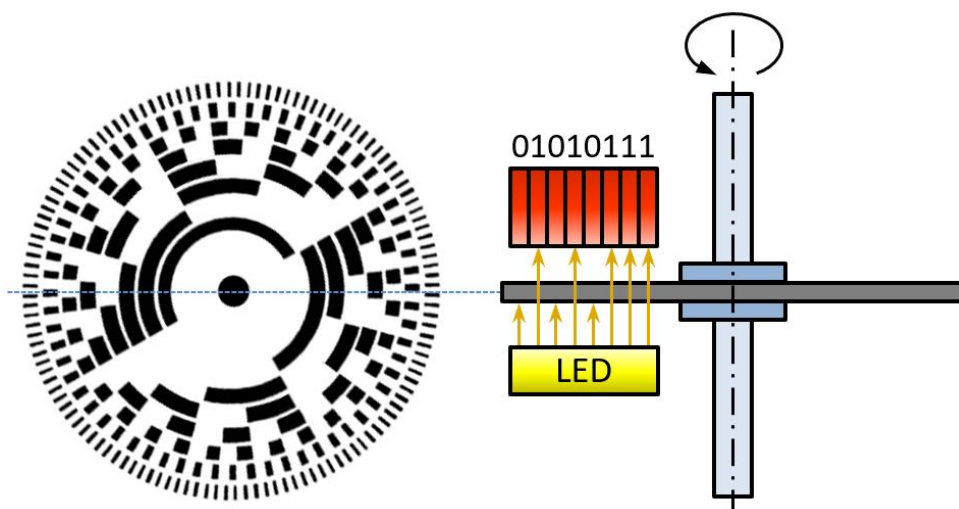
1.3.2 S prostorovým kódem

Posuvný pohyb je v tomto případě převáděn přímo na binární kód. Většinou se používá Grayův kód, který je specifický tím, že se mění vždy jen v jednom bitu. Snímač je obvykle založen na optickém principu, může být ale i magnetický, a měří absolutní polohu. (Kupka, 2022)



Obr. 22 – Základní princip snímače s prostorovým kódem, zdroj: autor dle (Lufinka, 2012)

Princip činnosti snímače je znázorněn na obr. 22. V závislosti na rozlišení je ve snímači určitý počet čidel, z nichž každé snímá jeden bit kódu. Provedení snímače může být nejen lineární, ale i rotační, viz obr. 23. Vyrábí se pro měření v rozsahu od desítek mm až po jednotky m. Výhody těchto snímačů jsou, mimo přímého měření absolutní polohy, obdobné jako u snímačů inkrementálních. Nevýhodou je jejich poměrně vysoká cena. (Kupka, 2022)



Obr. 23 – Princip činnosti rotačního absolutního optického senzoru, zdroj autor

Grayův kód patří mezi tzv. bezpečné kódy. Patent US2632058 Pulse Code Communication z roku 1953 (Grey, 1953) byl podán F. Greyem již v roce 1947. Při přechodu z jednoho stavu do druhého (z jedné polohy do druhé), dojde, na rozdíl od binárního kódu, ke změně bitového vyjádření jen v jednom bitu. Do skupiny bezpečných kódů se řadí také méně často používaný kód Johnsonův (někdy označovaný jako Libaw-Craigův) pracující na principu posuvného registru (PLC automatizace, 2023d). Jeho nevýhodou je vyšší náročnost na počet bitů (stop snímače). Oproti tomu je u Grayova kódu počet bitů stejný jako v případě binárního kódu.

Konstrukce absolutních senzorů polohy s využitím bezpečných kódů, typicky Greyova, umožňuje detekci chyb a zahrnutí samoopravných funkcí. Realizace je podobně jako u inkrementálních snímačů možná ve dvou variantách. Může být použita realizace vícestopá se zrcadlovým BRGC (Binary Reflected Gray Code) kódem (obr. 22 a obr. 23). Další možností je realizace s jednostopým STGC (Single Track Gray Code) kódem.

Pro minimální rozlišení s přesností jednoho stupně, tj. 360 poloh na jednu otáčku, je u BRGC nutné minimálně 9bitové kódové slovo, protože $2^9 = 512 > 360$. To vede na nutnost použití kotouče nebo pravitka s 9 stopami a stejným počtem snímačů. Podobná redukce počtu stop

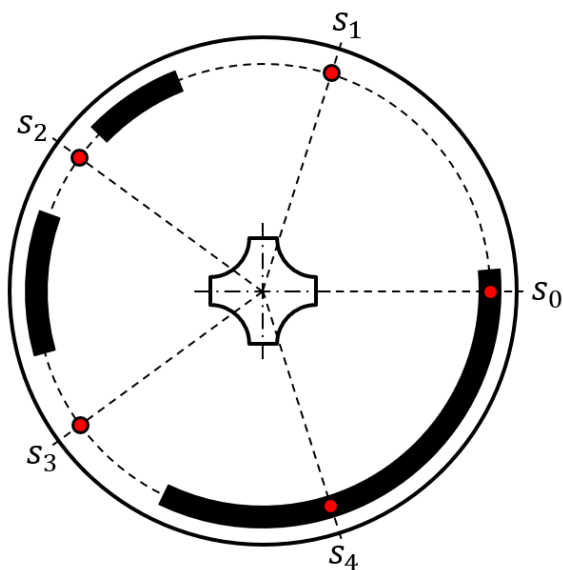
jako u inkrementálního snímače se čtyřnásobným vyhodnocováním (2 snímače na vnější stopě) vede při zachování možnosti rozlišení jednoho stupně na realizaci s 8 stopami. Další redukce už ale není možná (PLC automatizace, 2023b). U STGC pak postačuje jediná stopa s 9 snímači.

Počet stavů, které lze rozlišit se u STGC vypočte pomocí vztahu

$$p = 2^n - 2 \quad (1)$$

kde n je počet bitů (snímačů) a nejsou povoleny kombinace, při kterých jsou aktivní nebo naopak neaktivní všechny snímače. Např. při $n = 5$, realizace je na obr. 26, je počet možných stavů 30, pro $n = 7$ je to 126 a pro $n = 9$ pak 510. Správné rozložení segmentů na stopě je pak samozřejmě konstrukčně složitější úlohou, nicméně výsledný senzor je i tak výrobně jednodušší. STGC realizace je oproti BRGC poměrně nová. Patentována byla v roce 1994 (patent NZ264738, Spedding, 1994) a v roce 2001 (Hiltgen, 2001) bylo představeno funkční řešení s 9 snímači a 360 polohami v rámci otáčky.

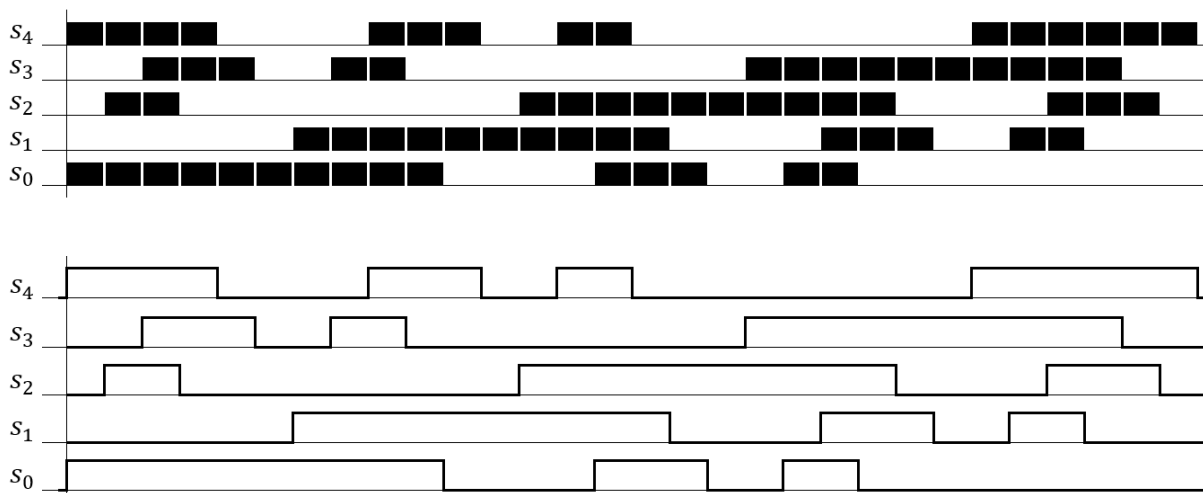
Pro jednoduchost lze k vysvětlení principu využít jednostopý kotouč s 5 snímači, resp. s 5bitovým kódovým slovem, viz obr. 24. V souladu s (1) lze rozlišit celkem 30 různých stavů. Průběhy ilustrující aktivaci snímačů v průběhu otáčky a jim odpovídající elektrické signály jsou na obr. 25.



Obr. 24 – Schéma jednostopého kotouče s pěti snímači, zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023b)

Ve výchozím stavu na obr. 24, jsou aktivovány snímače s_0 a s_4 , v dalším stavu s_0, s_1 a s_4 , následně s_0, s_2, s_3 a s_4 , pak s_0, s_3 a s_4 atd. Změna je vždy v jednom bitu, k aktivaci všech pěti snímačů, nebo naopak žádného snímače, nikdy nedojde – to slouží k indikaci chybového stavu.

Na obr. 26 až obr. 28 jsou průmyslová provedení absolutních snímačů polohy s prostorovým kódem. Snímače mohou být konstruovány v otevřeném i v uzavřeném provedení, s využitím výše uvedených principů, v rotačním provedení jako jedno- i víceotáčkovém, s různými typy hřídelí nebo průvlečné.

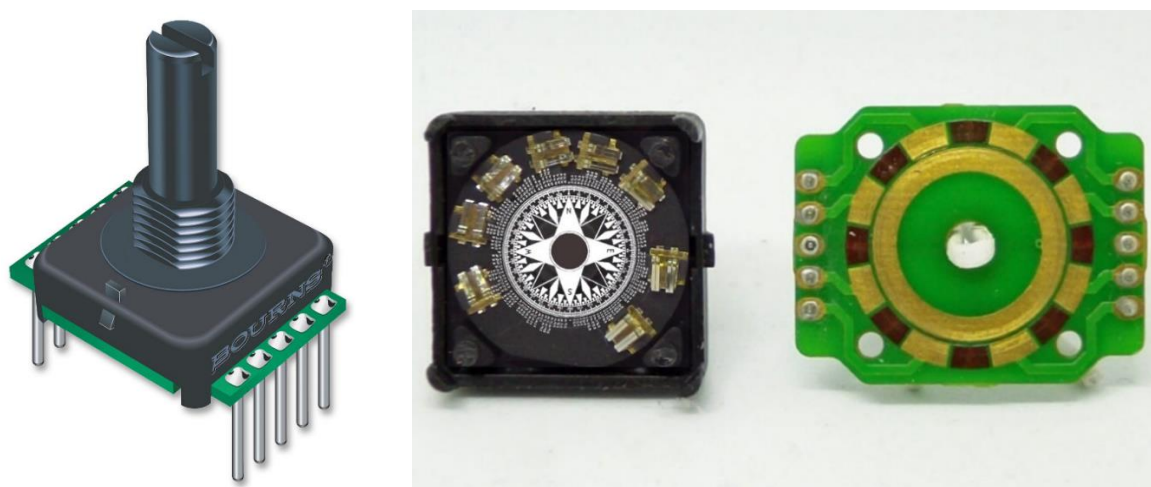


Obr. 25 – Průběh aktivace snímačů a odpovídající průběhy elektrických signálů, zdroj autor dle (PLC AUTOMATIZACE, 2023b)



Obr. 26 – Různá průmyslová provedení absolutních rotačních senzorů polohy, zdroj (Balluff, 2023a)

Dostupné jsou jednak senzory ve vyšší cenové hladině v robustním průmyslovém provedení, běžně s krytím IP6x (např. produkty firmy Balluff na obr. 26), ale také levné kompaktní senzory. Např. kontaktní senzor Bourns ACE-128 (obr. 27) od společnosti Premier Farnell s osmi miniaturními kontakty na jedné stopě (8bitový Grayův kód) se 128 rozlišitelnými úrovněmi v rámci jedné otáčky. Na obr. 28 je pak uveden otevřený jednostopý lineární senzor LIC 2100 s Greyovým kódem od německé společnosti Heidenhain.



Obr. 27 – Absolutní jednostopý kontaktní snímač s Greyovým kódem Bourns ACE-128, zdroj (Premier Farnell, 2023 a Redhunter, 2022)

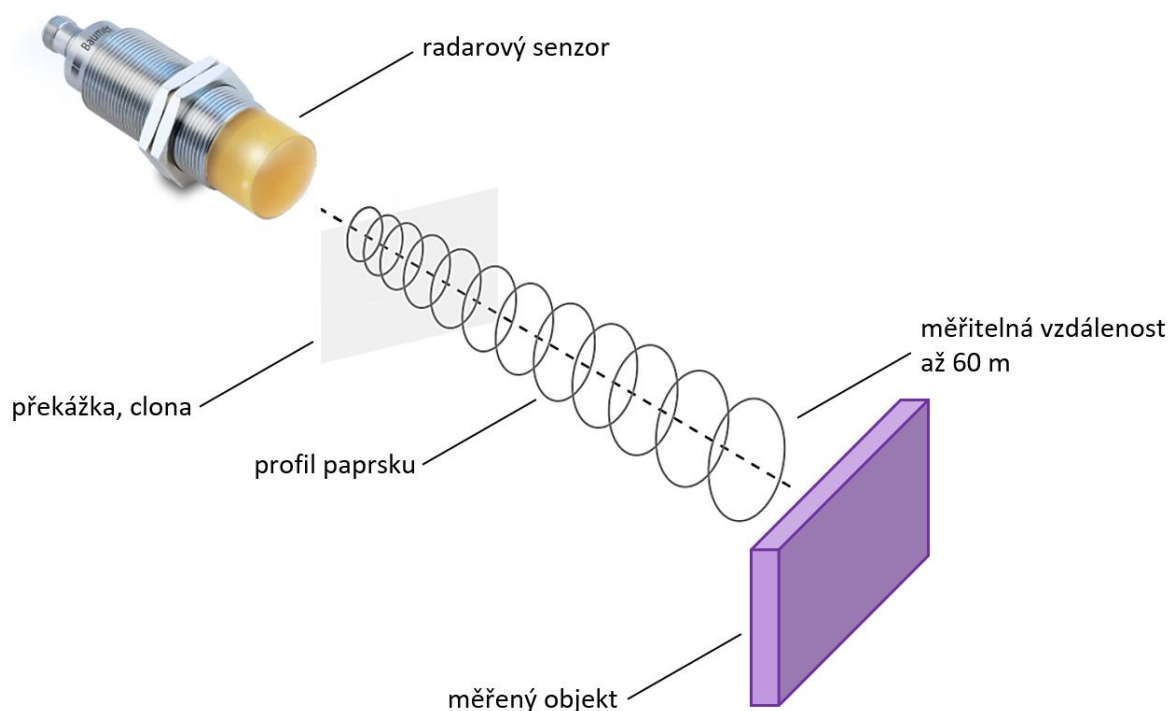


Obr. 28 – Otevřený jednostopý absolutní lineární senzor polohy LIC 2100, zdroj (Heidenhain, 2023)

1.4 Radarové

K měření polohy lze využít také radarové senzory, které umožňují měření objektů na velké vzdálenosti (až cca 60 m), viz obr. 29. Mimo to s nimi lze měřit samozřejmě také relativní rychlost sledovaného objektu.

Existuje několik různých principů činnosti radarových senzorů polohy. Podobně jako u ultrazvukových senzorů může být vyhodnocována doba mezi vysláním a návratem rádiových (elektromagnetických) mikrovln po jejich odrazu od sledovaného objektu (tzv. ToF – Time of Flight metoda). Používané frekvence jsou obvykle v rozmezí od 100 Mhz až do cca 100 GHz. Při měření hladiny se používají tzv. impulzní radarové senzory. Jimi emitované rádiové vlny se odráží na rozhraní prostředí s různou permitivitou. I v tomto případě se měří doba mezi vysláním a příchodem vlny.



Obr. 29 – Princip měření vzdálenosti radarovým senzorem, zdroj (Baumer NV, 2023c)

Moderní radarové senzory polohy jsou často založeny na technologii frekvenčně modulované spojitě vlny (FMCW – Frequency Modulated Continuous Wave). V tomto případě se neměří doba, ale vzájemný posun frekvence vyslaného a přijatého signálu. Výhodou je, že rozdíl frekvencí lze měřit přesněji než časový interval. Tyto senzory obvykle pracují s vysokou nosnou frekvencí, což umožňuje generovat velmi úzké kužely vyslaného paprsku a lze tak detekovat i velmi malé objekty na velké vzdálenosti bez rizika rušení okolními objekty. Odezva radarových senzorů při detekci objektu je velmi rychlá (řádově ms) a lze detekovat i pohybující se objekty. Např. senzory spol Baumer NV využívají periodicky modulaci (lineární frekvenční rozmítání) v podobě pilového průběhu. Během doby frekvenčního rozmítání se u nich zvyšuje frekvence od 122 do 123 GHz (Baumer NV, 2023c). Příklady několika průmyslových senzorů jsou na obr. 30.



Obr. 30 – Průmyslová provedení radarových senzorů, zdroj (Baumer NV, 2023c)

2 Senzory pro měření otáček

Měření otáček se řadí mezi základní a zároveň nejdůležitější disciplíny měření neelektrických veličin. Znalost otáček je nezbytná jak u pohonných systémů v dopravě i jinde, ale i u strojů a strojních zařízení v průmyslu.

K měření otáček se využívá mnoha fyzikálních principů, jejich přehled je v tab. 1, ale nejčastěji jsou senzory otáček založeny na převodu měřené úhlové rychlosti na jinou fyzikální veličinu.

Otáčky, resp. přesněji frekvence otáčení n , vyjadřují změnu polohy tělesa při rotaci (počet otáček N) za určitý čas a lze je tedy definovat

$$n = \frac{N}{T} \quad (2)$$

Jednotkou je $[s^{-1}]$, ale častěji se používají otáčky za minutu [ot/min], v angličtině revolutions per minute [rpm], příp. otáčky za sekundu [ot/s], v angličtině revolutions per second [rps].

Tab. 1 – Základní přehled snímačů otáček, zdroj autor

Skupina snímačů	Bližší specifikace	Základní princip měření nebo typ přístroje
Mechanické	Mechanická počítadla	Válečkové nebo řadové počítadlo, rezonanční otáčkoměr, Jaquetův tachoskop
Odstředivé	Mechanické	Wattův odstředivý otáčkoměr
	Kapalinové	Tachograf, Bifluidální otáčkoměr
Elektrické spojitě	Tachodynamo	Využívá se elektromagnetická indukce – stejnosměrný generátor
	Tachoalternátor	Využívá se elektromagnetická indukce – střídavý generátor
	Magnetický otáčkoměr	Účinky vířivých proudů v hliníkovém prstenci při otáčení magnetu
Elektrické bezdotykové a impulzní	Detekující polohu značky	Detekce značky na rotující součásti měřeného objektu s vyhodnocením počtu pulsů za čas (frekvence) nebo doby mezi pulsy (čas)
	Inkrementální	Výše probraný princip IRC senzorů
	S prostorovým kódem	Výše probraný princip ARC senzorů
	Kapacitní	Změna kapacity při průchodu kovové destičky mezi deskami měřicího kondenzátoru
	Indukčnostní	Změna vlastní nebo vzájemné indukčnosti cívky při rozpoznání feromagnetického výstupku
	Indukční	Změna magnetického pole v cívice při rozpoznání feromagnetického výstupku
	S Hallovou sondou	Detekce magnetického pole kotouče s permanentními magnety pomocí Halovy sondy
	S Wiegandovým jevem	Detekce změny magnetického pole s využitím Wiegandova jevu (s napěťovým impulzem)
	S jazýčkovými kontakty	Detekce magnetického pole kotouče s permanentními magnety sepnutím jazýčkového Reedova kontaktu
	S vířivými proudy	Vysazování oscilací rezonančního obvodu při průchodu kotouče mezerou cívky vlivem vířivých proudů
	Speciální optické s laserem	Detekce světla odraženého od reflexních plošek na hřídeli nebo využití Dopplerova jevu
	Stroboskopické	Setrvačnost zrakového vjemu způsobující spojování oddělených fází pohybu (stroboskopický efekt)

2.1 Mechanické

Kontaktní mechanické snímače otáček se v dnešní době používají spíše zřídka. V jednoduchých aplikacích lze využít různá mechanická počítadla (obr. 31). V některých případech je možné

nulování počítadla pomocí páčky nebo tlačítka a mechanická počítadla doplněná o kotouč vhodného průměru lze použít také k jednoduchému kontaktnímu měření vzdálenosti (obr. 31 vpravo).



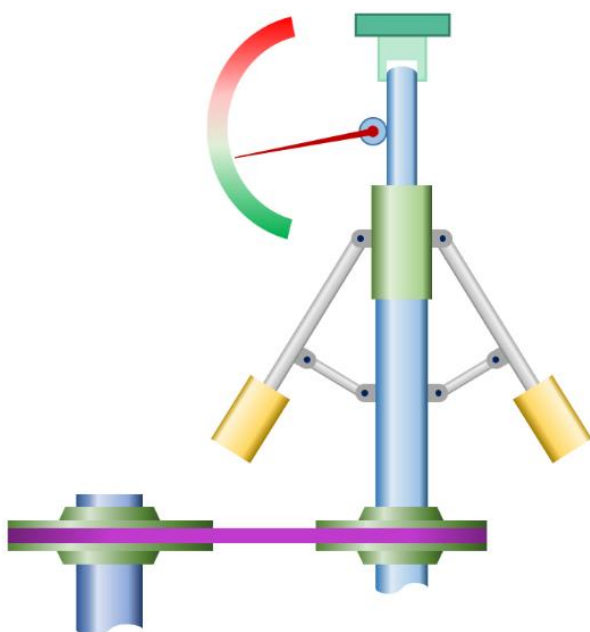
Obr. 31 – Různá provedení mechanických počítadel, zdroj (Winston Electric, 2023) a (Baumer NV, 2023a)

Dalším, dnes již historickým zařízením pro měření otáček je chronometrický otáčkoměr – tachoskop (resp. Jaquetův tachoskop). Tachoskop integruje do jednoho přístroje počítadlo otáček a hodiny. Měří celkový počet otáček za určitý čas, resp. střední hodnotu frekvence otáčení.

Do skupiny mechanických otáčkoměrů se řadí také rezonanční (jazýčkové, ladičkové) otáčkoměry využívající vlastností mechanických rezonátorů, které se skládají z řady malých na jedné straně vetknutých ocelových nosníků (krakorců) naladěných na rezonanční kmitání např. s odstupem 0,25 až 0,5 Hz. Pracují nespojitě a lze je použít jen pro indikaci otáček v omezeném rozsahu.

2.2 Odstředivé

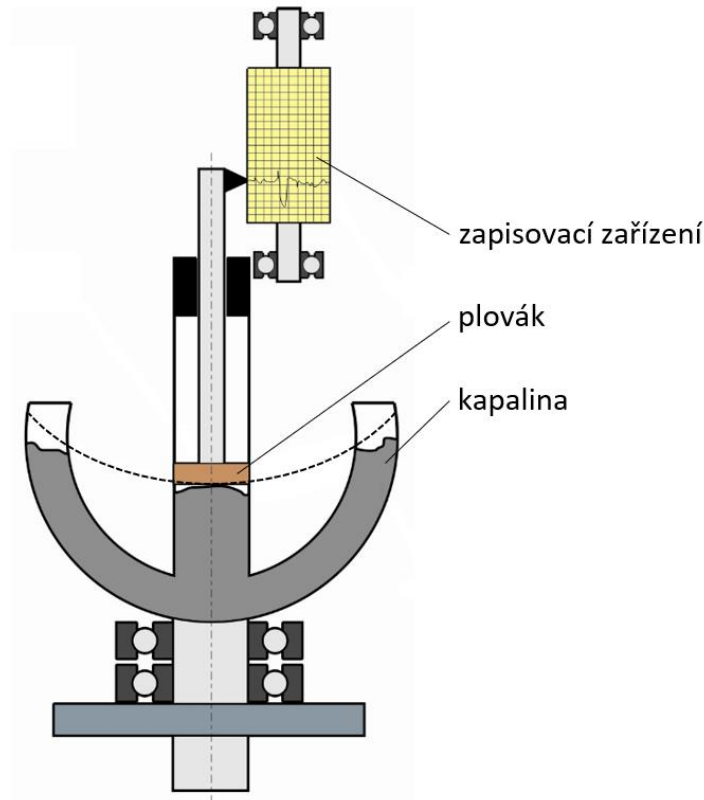
Odstředivé otáčkoměry pracují buď na mechanickém nebo na hydraulickém principu. Jedná se opět o dnes již historická řešení, která se ale v omezení míře ještě využívají. Jejich nevýhodou je především absence elektrického výstupního signálu.



Obr. 32 – Schéma Wattova odstředivého otáčkoměru, zdroj autor dle (Benda, 2008)

Mechanický Wattův otáčkoměr, jehož schéma na obr. 32, pracuje na principu změny odstředivé síly působící na závaží při otáčení. V minulosti se používal jako měřicí člen při regulaci u parních lokomotiv a lokomobil. Lze jej použít pro měření otáček v širokém rozsahu od 30 až po 12 tisíc ot/min, ale nikoli u měřených objektů s nízkým mechanickým výkonem.

Hydraulický otáčkoměr (resp. tachograf) využívá při měření frekvence otáčení také vlivu odstředivých sil, v tomto případě při rotaci kapaliny. Otáčky se určí na základě změny výšky rotující kapaliny (obvykle rtuti) v uzavřené nádobě, viz obr. 33. Měřit lze otáčky v širokém rozmezí od 20 do 10 tisíc ot/min.



Obr. 33 – Schéma hydraulického odstředivého otáčkoměru, upraveno dle (Benda, 2008)

2.3 Elektrické spojitě

Mezi kontaktní senzory otáček se spojitým výstupem patří především senzory elektrodynamické a pak také tzv. magnetoindukční otáčkoměr, který se historicky velmi často používal k určování rychlosti dopravních prostředků.

2.3.1 Elektrodynamické

Významnou skupinu otáčkoměrů s elektrickým spojitým výstupem tvoří elektrodynamické senzory, které se dále dělí na **tachodynamy** a **tachoalternátory**. Senzory jsou založeny na principu Faradayova indukčního zákona, kdy se v proměnném elektromagnetickém poli indukuje v cínce elektromotorické napětí

$$u_e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

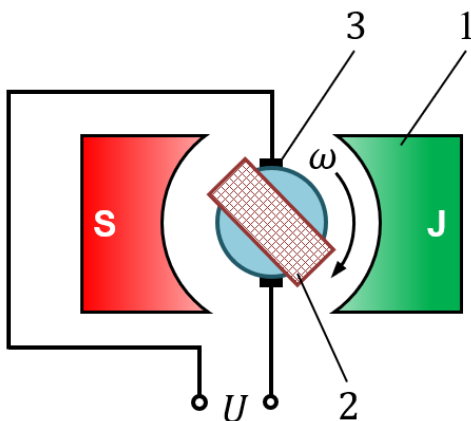
přičemž N je počet závitů cívky a Φ celkový magnetický tok. Dále v souvislosti s tím platí, že ve vodiči délky l pohybujícím se kolmo na siločáry magnetického pole s indukcí B se indukuje napětí

$$u = B l v \quad (4)$$

Na uvedeném principu fungují všechny stejnosměrné motory a generátory, bez ohledu na to, mají-li cizí (i permanentní magnety), sériové nebo paralelní buzení.

Tachodynamo je tvořeno permanentním magnetem v jehož magnetickém poli se otáčí rotor s vinutím, jehož konce jsou vyvedeny na komutátor, z něhož se pomocí sběrných kartáčů snímá napětí odpovídající otáčkám, viz obr. 34. Jedná se v podstatě o malý komutátorový točivý stroj s kovovými kartáči, který by ale pro svoji optimální funkci měl co nejméně zatěžován. Výhodou tachodynamu je, že z polarity výstupního napětí lze přímo zjistit směr otáčení. Mezi další výhody patří konstrukční jednoduchost, velká citlivost, přesnost a lineární závislost výstupního napětí na otáčkách. Mezi nevýhody pak zvlnění výstupního napětí, již zmiňovaná nemožnost zatížení a nemožnost využití pro měření vysokých otáček (problém s kartáči).

Variantně nemusí být vinutí rotoru připojeno na komutátor, který pak u tohoto typu tachodynamu chybí, takže nedochází k usměrnění a tachodynamo je zdrojem střídavého signálu. Tachodynamu jsou vyráběna v různých provedeních, mohou být přírubová s volnou hřídelí, průvleková nebo dvojitá.

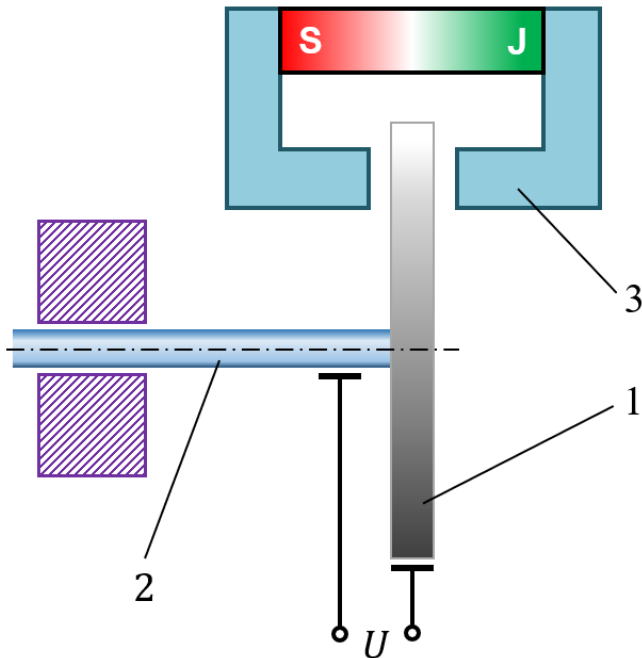


Obr. 34 – Základní schéma tachodynamu: 1 – permanentní magnet, 2 – rotující cívka, 3 – sběrné kartáče, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

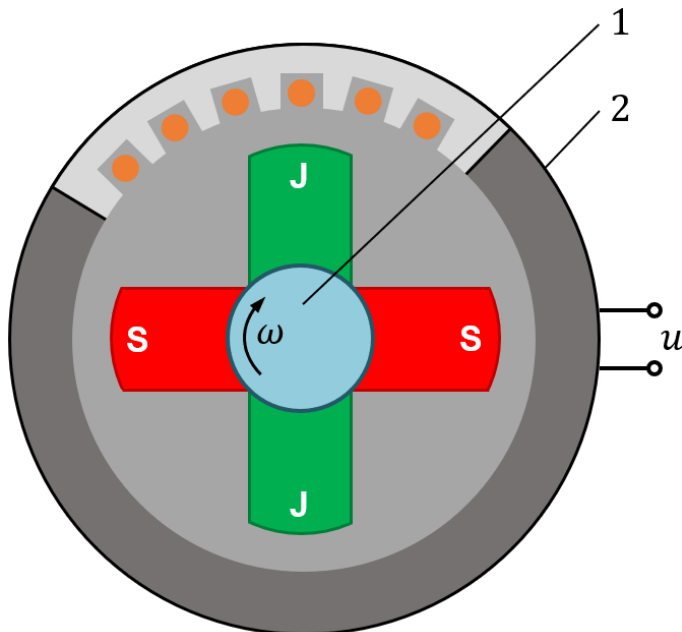
Unipolární dynamo je tvořeno hliníkovým kotoučem spojeným s otáčející se hřídelí, na který působí magnetické pole permanentního magnetu (obr. 35). Výstupní napětí je podobně jako u tachodynamu stejnosměrné. Na výstupní svorky je přivedeno prostřednictvím kluzných kontaktů, s čímž je spojená nevýhoda vlivem přechodovým odporům na nich.

Střídavý **tachogenerátor**, resp. **tachoalternátor** může být dvojího typu. Buď se jedná o střídavý generátor synchronní, viz obr. 36, nebo asynchronní. Rotor je v obou případech tvořen

permanentním magnetem, který generuje magnetický indukční tok. Ve statoru jsou drážky, ve kterých je uloženo jedno- nebo třífázové vinutí. Ve statorových cívkách indukované střídavé napětí a jeho frekvence jsou pak úměrné měřeným otáčkám. Frekvence je závislá na otáčkách rotoru a též na počtu pólových nastavců.



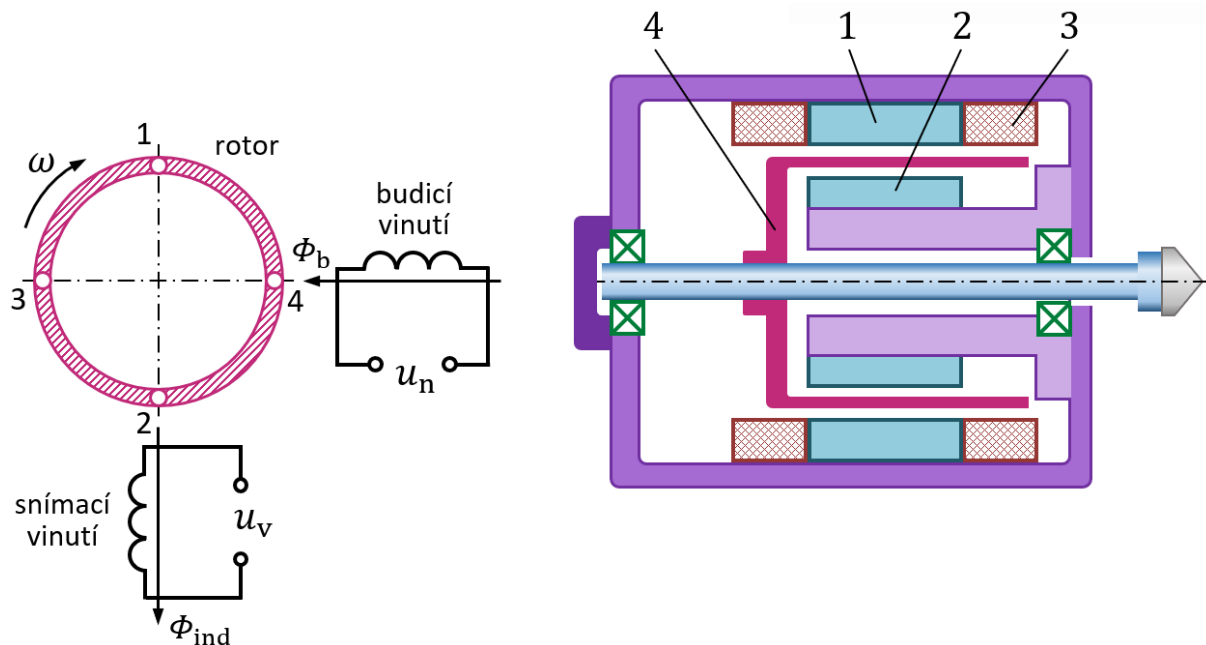
Obr. 35 – Schéma unipolárního dynama: 1 – hliníkový kotouč, 2 – hřídel, 3 – permanentní magnet s nastavci, zdroj autor dle (Chudý, 1999)



Obr. 36 – Synchronní tachogenerátor: 1 – rotor s permanentními magnety, 2 – stator s drážkami a vinutím (částečný řez), zdroj autor dle (Chudý, 1999)

V případě asynchronního tachogenerátoru se často používá tzv. bubínkový rotor. Generátor s bubínkovým rotorem svojí konstrukcí připomíná jednofázový indukční motor a skládá se ze dvou pevných cívek navzájem pootočených o 90° , viz obr. 37. Jedna z cívek je trvale připojena

ke střídavému napájení a ve druhé cívce, která je snímací, se pak indukuje výstupní napětí. Alternativně může být rotor konstruován v podobě klecové kotvy. Stator se skládá z plechů s drážkami pro vinutí. Závislost mezi výstupním napětím (pohybuje se v rozmezí 10 až 100 V) a úhlovou rychlostí je lineární pouze v nezátíženém stavu.



Obr. 37 – Asynchronní tachogenerátor s bubínkovým rotorem: 1 – vnější část statoru, 2 – vnitřní část statoru, 3 – statorové vinutí, 4 – bubínkový rotor, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

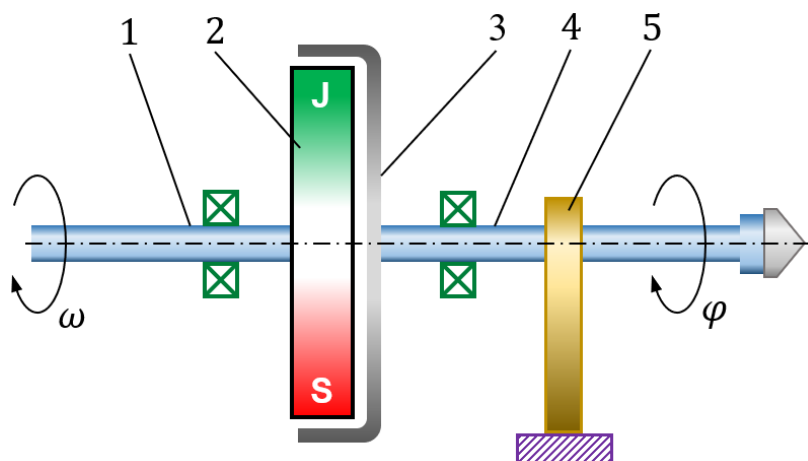
Na obr. 38 jsou tři různá průmyslová provedení elektrodynamických otáčkoměrů vyráběná spol. Baumer (průvlečná i s hřídelí).



Obr. 38 – Různá průmyslová provedení elektrodynamických otáčkoměrů, zdroj (Baumer NV, 2023b)

2.3.2 Magnetoindukční otáčkoměr

Magnetoindukční senzor otáček, jehož schéma je na obr. 39, pracuje na principu vířivých proudů. V magnetickém poli permanentního magnetu je umístěn vodivý hliníkový kotouč, který se vlivem silového působení magnetického pole a vlivem vířivých proudů otáčí. Úhel natočení je přímo úměrný měřeným otáčkám. Sensory založené na zmiňovaném principu se nejčastěji používají k určování rychlosti u dopravních prostředků.



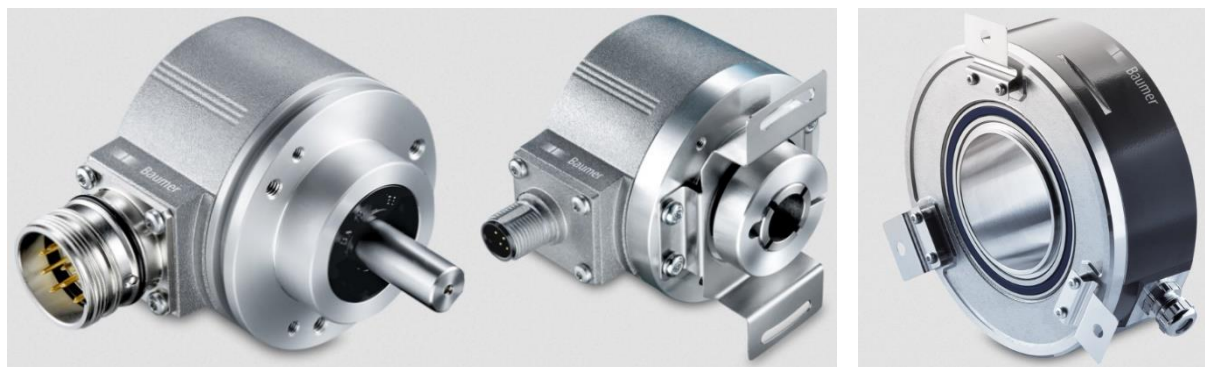
Obr. 39 – Princip magnetoindukčního otáčkoměru: 1 – hřídel měřeného objektu, 2 – permanentní magnet, 3 – vodivý kotouč (hrníček), 4 – hřídel senzoru, 5 – pružina, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4 Elektrické bezdotykové a impulzní

Bezdotykové a impulzní senzory otáček pracují na principu sejmutí jednoho nebo více impulzů na otáčku s využitím mnoha principů (viz tab. 1). Lze měřit buď počet impulzů za otáčku, resp. za jednotku času, nebo čas mezi dvěma po sobě následujícími impulzy.

2.4.1 IRC a ARC

K měření otáček se dají využít také optoelektronické, magnetické, příp. mechanické inkrementální a absolutní senzory v rotačním provedení. Ty byly již podrobně probrány v kapitole 1.3. Příklady průmyslových senzorů Baumer jsou uvedeny na obr. 40.

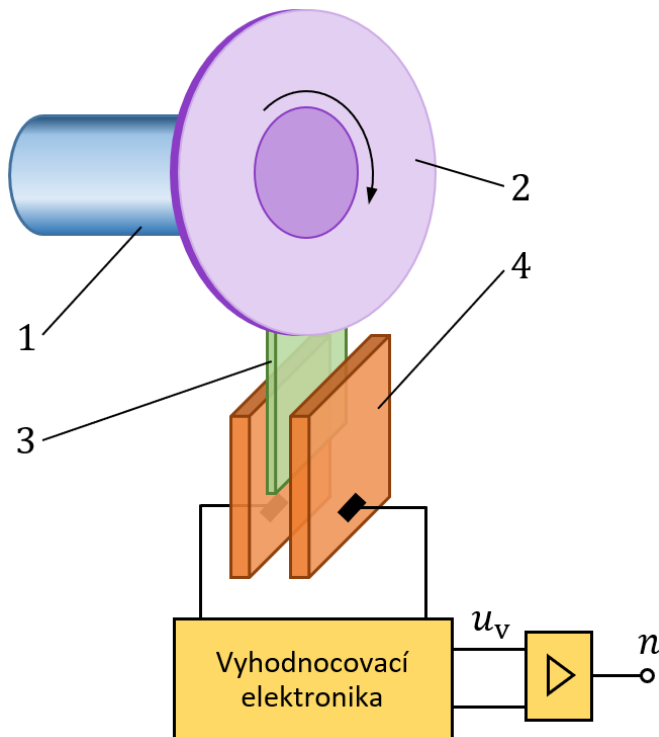


Obr. 40 – Různá průmyslová provedení IRC a ARC senzorů, zdroj (Baumer NV, 2023d)

2.4.2 Kapacitní

Kapacitní senzory otáček jsou založeny na změně kapacity při průchodu kovové destičky mezi deskami měřicího kondenzátoru, viz schéma na obr. 41. Součástí senzoru je vyhodnocovací elektronika, která zajišťuje mj. potlačení vlivu parazitních kapacit a rušení a jejíž součástí jsou

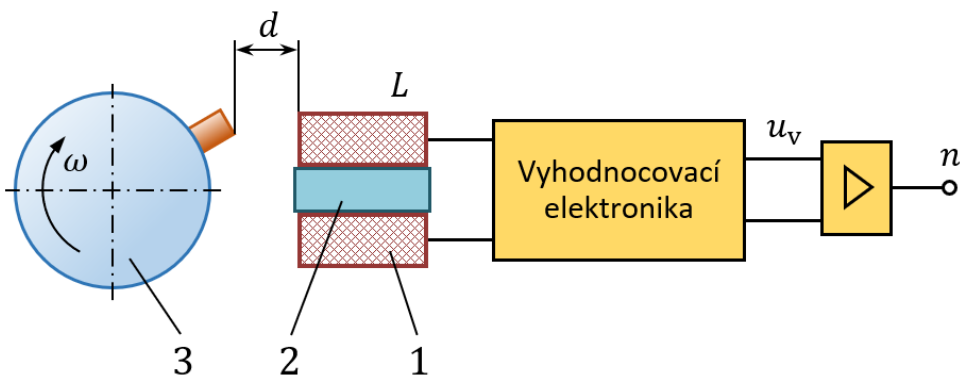
různě realizované měřicí obvody (můstkové, rezonanční, oscilátorové). Výstupní signál je ve tvaru impulzů, jejichž frekvence odpovídá měřeným otáčkám. Impulzy se pak pomocí čítače převádí na otáčky.



Obr. 41 – Princip kapacitního senzoru otáček: 1 – hřídel, 2 – kotouč, 3 – kovová destička, 4 – deskový kondenzátor, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4.3 Indukčnostní

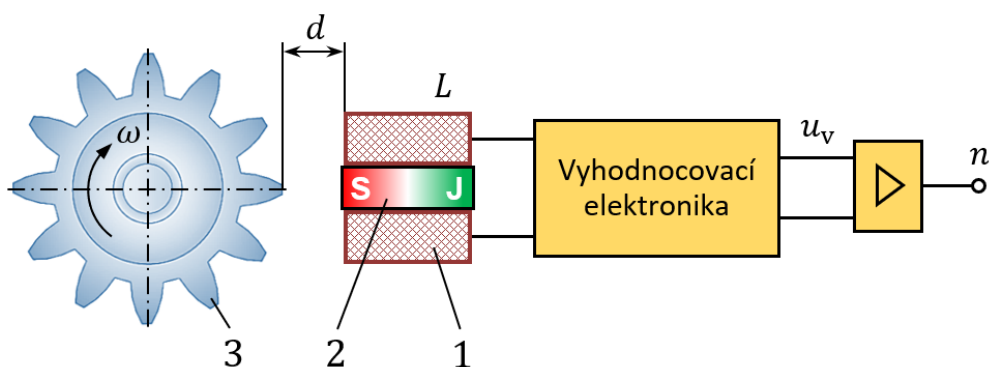
Princip činnosti indukčnostních senzorů otáček je založen na změně vlastní nebo vzájemné indukčnosti cívky. Jedno z mnoha možných konstrukčních uspořádání je na obr. 42. Rotací kotoučku s feromagnetickým výstupkem dochází ke změně vzdálenosti d mezi cívkou a výstupkem, čímž se mění indukčnost L . Výstupní signál $u_v(t)$ je tvořen pulzy, jejichž frekvence odpovídá měřeným otáčkám, které jsou stanoveny čítačem.



Obr. 42 – Princip indukčnostního impulsního senzoru otáček: 1 – cívka, 2 – jádro, 3 – kotouček s feromagnetickým výstupkem, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

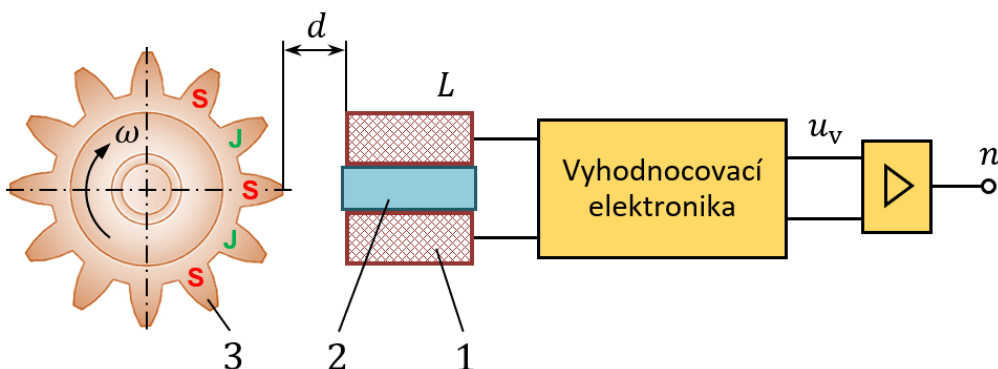
2.4.4 Indukční

Indukční elektromagnetické senzory otáček jsou založeny na principu změny magnetického pole v cívce. Tím dochází ke změně magnetického indukčního toku, což je nejčastěji způsobeno změnou impedance magnetického obvodu. Jedná se o snímače otáček s otevřeným magnetickým obvodem. Základní princip činnosti je na obr. 43. V okamžiku přiblížení feromagnetického výstupku k cívce s jádrem z permanentního magnetu dojde ke změně reluktance (magnetického odporu) a tím i impedance magnetického obvodu. Vlivem toho se v cívce generuje napětí úměrné měřeným otáčkám. Výstupní signál může být analogový i číslicový.

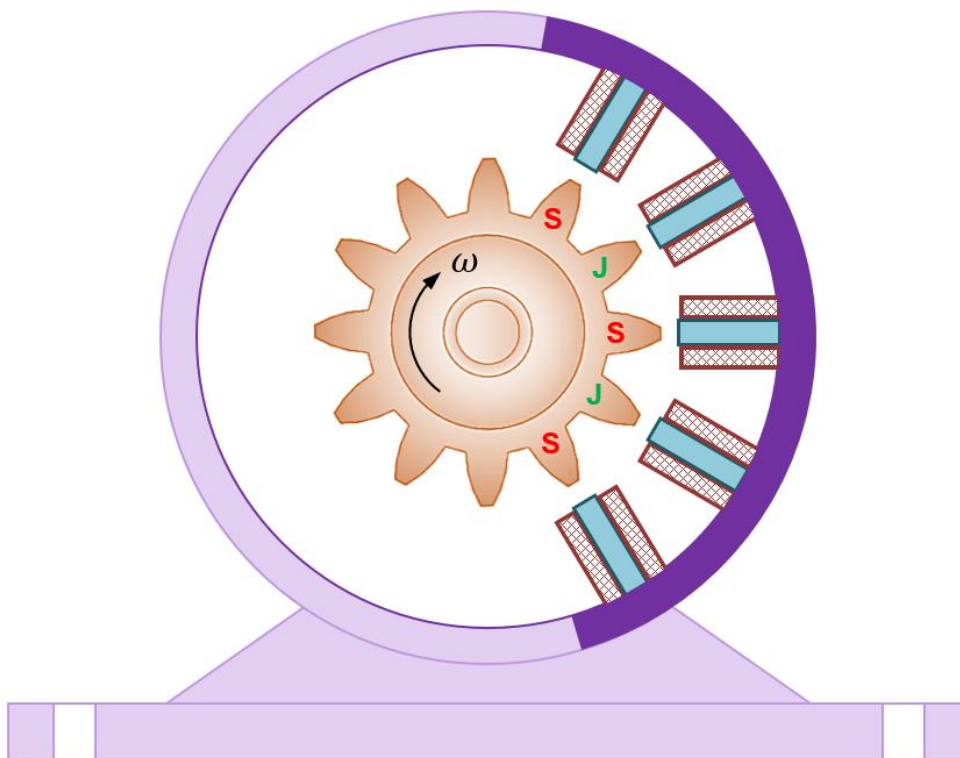


Obr. 43 – Princip elektromagnetického impulzního senzoru otáček s cívkou s jádrem z permanentního magnetu: 1 – cívka, 2 – jádro cívky tvořené permanentním magnetem, 3 – kotouček s výstupky z magneticky měkkého materiálu, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

Další možné konstrukční řešení je uvedeno na obr. 44. V tomto případě je změna magnetického pole vyvolaná přiblížením, resp. oddálením výstupků tvořených permanentními magnety. V cívce s feromagnetickým jádrem se pak indukuje napětí úměrné otáčkám. Často se v praxi také využívá konstrukční řešení na obr. 45. Senzor otáček se skládá z vinutého statoru a rotoru s pólovými dvojicemi z permanentních magnetů. Počet pólových dvojic odpovídá předpokládané rychlosti otáčení. Pro nízké rychlosti jich může být až 16, přičemž statorové vinutí je pak vícefázové. Díky tomu lze rozlišit směr otáčení. Významnou výhodou elektromagnetických senzorů je fakt, že jsou aktivní a nepotřebují tedy napájení. Nevýhodou je, že charakteristika snímače je lineární pouze v nezátíženém stavu a výrazná teplotní závislost.



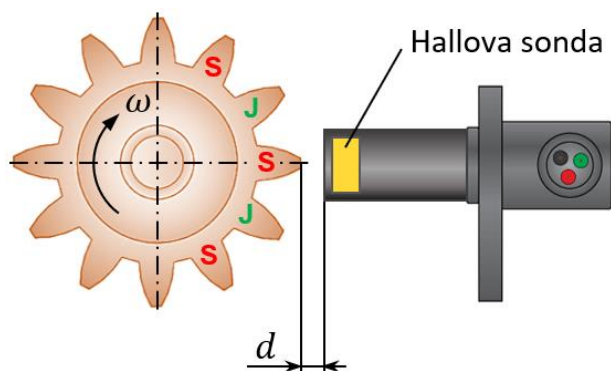
Obr. 44 – Princip elektromagnetického impulzního senzoru otáček s kotoučkem s permanentními magnety: 1 – cívka, 2 – jádro cívky z magneticky měkkého materiálu, 3 – kotouček s výstupky tvořenými permanentními magnety, zdroj autor dle (Chudý, 1999)



Obr. 45 – Princip elektromagnetického impulsního senzoru otáček s vinutým statorem a rotorem s permanentními magnety, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4.5 S Hallovou sondou

Senzory při svojí činnosti využívají Hallova jevu, který byl již podrobněji vysvětlen v předchozích studijních blocích. Magnetické pole je vytvářeno kotoučem s permanentními magnety a následně je jeho změna detekována pomocí Hallovovy sondy, viz obr. 46. Senzory se velmi často využívají pro měření otáček spalovacích motorů a také u systémů ABS v automobilech.



Obr. 46 – Princip impulsního senzoru otáček s Hallovou sondou, zdroj autor

Na obr. 47 vlevo je typické provedení senzoru s Hallovou sondou a dále jsou uvedeny dvě běžná průmyslová provedení indukčních senzorů ve vazebním a nevazebním provedení. Uvedené provedení ve válcovém pouzdře je používáno i pro senzory otáček jiných typů.

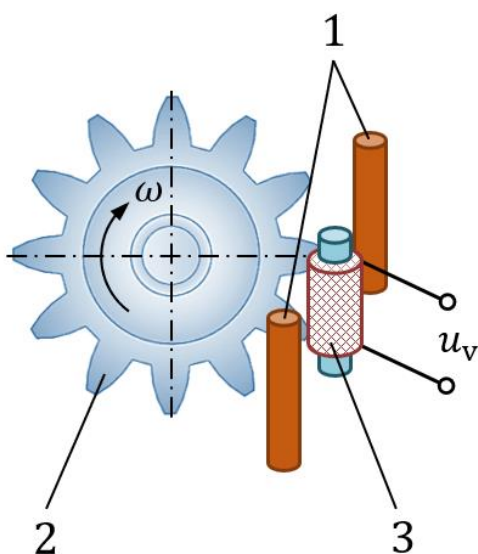


Obr. 47 – Průmyslová provedení impulzních senzorů s Hallovou sondou a indukčních ve vazebním a nevazebním provedení, zdroj (Ridex, 2021) a (Sensit, 2022)

2.4.6 S Wiegandovým jevem

Speciální indukční senzory otáček využívají při své činnosti Wiegandova jevu. Tzv. Wiegandův drát vyrobený z anizotropní slitiny se vlivem magnetostrikčních účinků chová jako jediná magnetická doména. Dojde-li ke změně magnetického pole vyvolané budící cívkou nebo permanentním magnetem, tak při jisté intenzitě pole dojde k přemagnetování jediným Berkhausenovým skokem a ve snímáči cívce se naindukuje krátký napěťový impulz. (Benda, 2008)

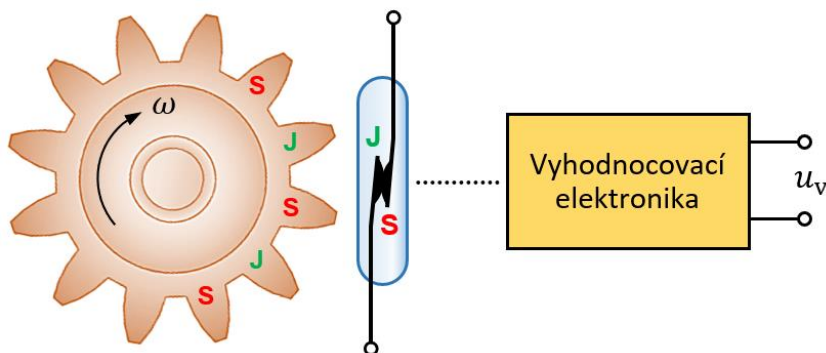
Schéma principu impulzního senzoru otáček s Wiegandovým jevem je na obr. 48. Na hřídeli spojené s měřeným objektem je umístěn kotouček s výstupky. Snímač je se fyzicky nachází mezi permanentními magnety. Jakmile se výstupek kotouče přiblíží ke snímači, dojde ke změně magnetického toku, čímž dojde k přemagnetování a v cívce se indukuje již zmiňovaný napěťový impulz. Impulzy odpovídající otáčkám se podobně jako u ostatních již uvedených typů impulzních senzorů zpracovávají v návazných elektronických obvodech.



Obr. 48 – Princip impulzního senzoru otáček s Wiegandovým snímačem: 1 – permanentní magnety, 2 – feromagnetický kotouč s výstupky, 3 – Wiegandův snímač, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4.7 S jazýčkovými kontakty

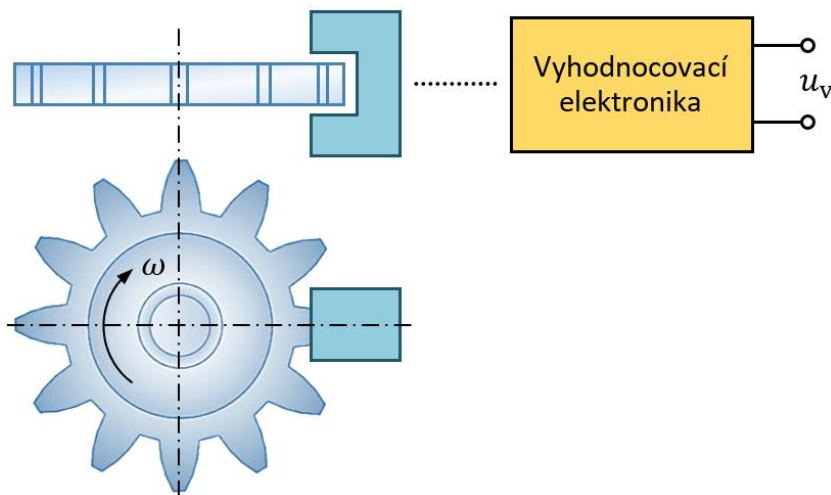
Další možností realizace citlivé části impulzního senzoru otáček je použití jazýčkového (tzv. Reedova) kontaktu. Pokud se v blízkosti kontaktu objeví magnetické pole permanentního magnetu (kotouč s výstupky umístěný na hřídeli), dojde ke zmagetování kontaktů a na jejich koncích se tak objeví opačné magnetické póly, čímž dojde k přitažení kontaktů k sobě a tím k sepnutí, viz obr. 49. Další zpracování je již obdobné jako u výše uvedených impulzních senzorů.



Obr. 49 – Princip impulzního senzoru otáček s jazýčkovými kontakty, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4.8 S vířivými proudy

Jedná se o senzory s tzv. vysazováním oscilací rezonančního obvodu (na obr. 50 je součástí bloku vyhodnocovací elektroniky) průchodem rotujícího kotouče s výstupky mezerou cívky v důsledku vířivých proudů a s tím spojené změny v magnetickém poli. Cívka je součástí LC oscilátoru naladěného na určitou frekvenci a v jejím okolí je elektromagnetické pole. Po průchodu výstupku kotouče umístěného na hřídeli spojené s měřeným objektem dochází vlivem vířivých proudů k vytvoření druhého magnetického pole v okolí výstupku, které podle Lenzova zákona působí proti poli, které ho vyvolalo. Tím dojde ke zmenšení intenzity původního pole a v souvislosti s tím ke zmenšení indukčnosti cívky a snížení amplitudy oscilací.

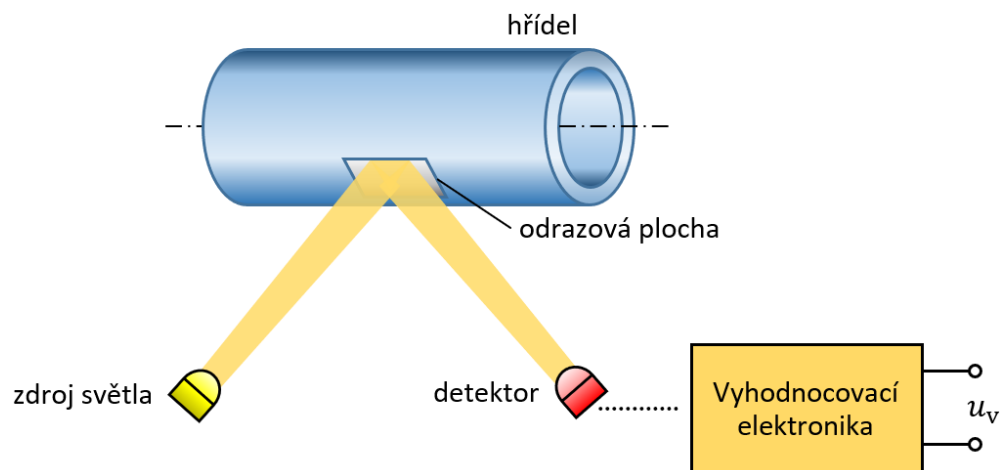


Obr. 50 – Princip impulzního senzoru otáček s vířivými proudy, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

Při komparaci s mezní hodnotou se vyhodnotí přítomnost výstupku a vygeneruje se pulz. Při otáčení kotouče pak dochází ke generování pulzů, po jejímž vyhodnocení se vyhodnocovací elektronikou stanoví odpovídající otáčky.

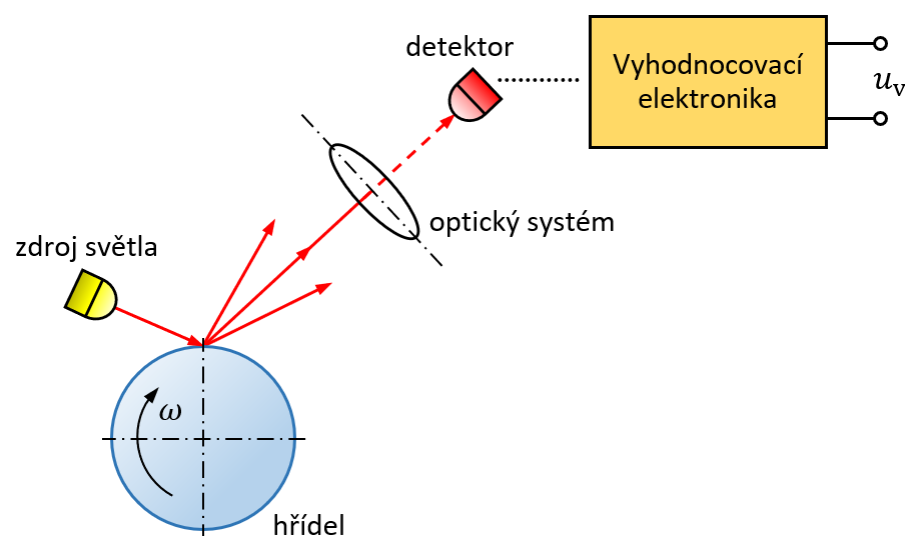
2.4.9 Optické speciální a s laserem

Kromě IRC a ARC senzorů na optické bázi existují také senzory s modulací optické cesty. Jejich princip je znázorněn na obr. 51. Světlo emitované zdrojem (LED nebo laserová dioda) se odráží od jedné, nebo pro přesnější měření, od více reflexních značek umístěných na hřídeli. Odražené světlo je snímáno fotodetektozem (fotorezistor, fotodioda nebo fototranzistor) a na základě toho je pak generováno napětí ve tvaru pulzů. V případě špatné přístupnosti lze využít světlovodů nebo různě navržených optických systémů.



Obr. 51 – Princip fotoelektrického impulzního senzoru otáček s modulací optické cesty, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

Na obr. 52 je princip senzoru pracujícího na principu odrazu koherentního světla laseru od povrchu rotujícího tělesa (hřídele).



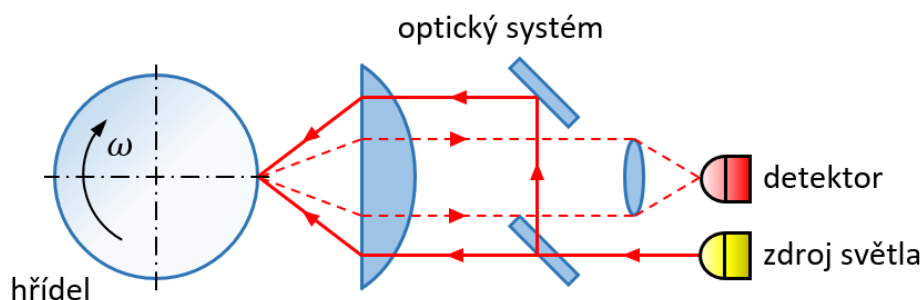
Obr. 52 – Princip impulzního laserového senzoru otáček, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

Osvětlený povrch hřídele se pak chová jako velký počet elementárních zdrojů světla z nichž se světlo šíří do okolního prostoru ve formě kulových vlnoploch. Ty spolu navzájem interferují a při zobrazení se jeví jako skvrnky, jejichž hustota a velikost přímo souvisí s kvalitou povrchu odrazu. Uvedená vlastnost je označována jako koherentní zrnitost. Rychlost pohybu skvrnek je úměrná úhlové rychlosti rotujícího předmětu. V praxi se ještě provádí filtrace přes optickou mřížku pro danou velikost skvrnek a pomocí fotoelektrického čidla a následných obvodů jsou generovány impulzy jejichž frekvence je úměrná rychlosti otáčení.

Další možností je využití Dopplerova jevu. Světelný Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky světelného záření, nastávající při vzájemném pohybu zdroje světla a detektoru. Emitovaný laserový paprsek se pomocí optického systému rozdělí na dva vzájemně rovnoběžné svazky, které jsou objektivem soustředěny do jednoho bodu na rotující hřídeli na níž jsou umístěny rozptylové plošky, viz obr. 53. V tomto místě dochází při odrazu k rozptylu světla a po zpětném průchodu optickým systémem k následné detekci fotoelektrickým snímačem, na jehož výstupu se objeví signál o frekvenci

$$f_D = \frac{2 \sin(\omega) \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (5)$$

kde λ je vlnová délka laseru, ω je měřená úhlová rychlost pohybu elementárních plošek v rovině světelného paprsku a α je úhel mezi osami paprsků.



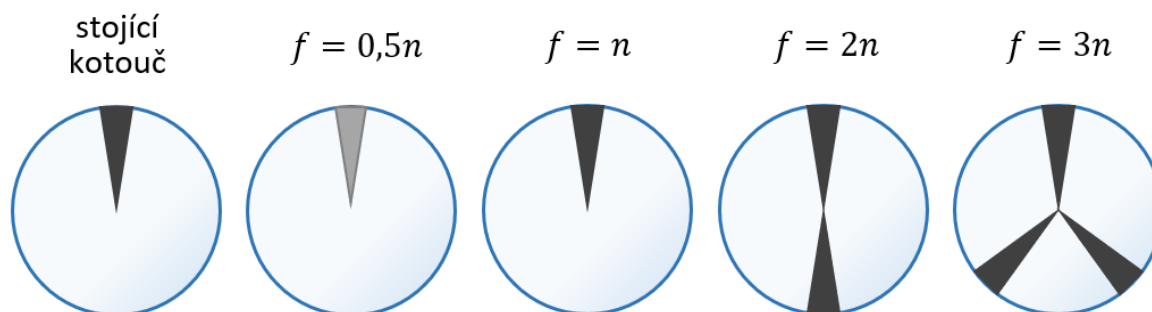
Obr. 53 – Princip impulzního laserového senzoru otáček s Dopplerovým jevem, zdroj autor dle (Chudý, 1999)

2.4.10 Stroboskopické

Stroboskopické měření otáček je založeno na tzv. stroboskopickém jevu, při kterém lidské oko vnímá rychle po sobě jdoucí obrazové vjemy jako jeden obraz. Jedná se o známý optický klam, který byl v minulosti při osvětlování výrobních hal s točivými stroji velmi nebezpečný, neboť se při určitých otáčkách zdály rotující části strojů jako nehybné. Problém se řešil buď použitím dvou různých napájecích napětí s různými frekvencemi pro zářivkové osvětlení, příp. se dvěma různými fázemi, nebo se používaly speciální předřadníky, které umožňovaly zářivky napájet napětím s frekvencí 30 kHz.

Hraniční frekvence vzniku stroboskopického jevu je 12 snímků za sekundu, čehož se využívá např. při filmové projekci (v tomto případě jde o 25 snímků za sekundu), kdy se ve skutečnosti nespojitý obraz, oku jeví jako spojitý. Praktické využití jevu při měření otáček je založeno na

dvou principech. Jedním z nich je umístění značky na rotující objekt. Mají-li záblesky stroboskopu frekvenci odpovídající rychlosti otáčení, oko vnímá rotující značku jako by se nepohybovala (je statická). Přesněji, jde-li o určité násobky frekvence, pak je značka vnímána v podobách na obr. 54. Frekvence záblesků stroboskopu je tedy buď identická nebo je přesným násobkem frekvence otáčení, přičemž stroboskop frekvenci obvykle zobrazuje na displeji. Stroboskopická měření jsou vhodná pro měření pouze ustálených otáček.



Obr. 54 – Vnímání značky na hřídeli při různých násobcích frekvence záblesků stroboskopu, zdroj autor dle (Jenčík, 2003)

Elektronický stroboskop (různá provedení na obr. 55), je přístroj, který se skládá z xenonové výbojky, nebo z výkonného zdroje tvořeného LED diodami, napájeného z pulzního generátoru s přesně nastavitelnou frekvencí.

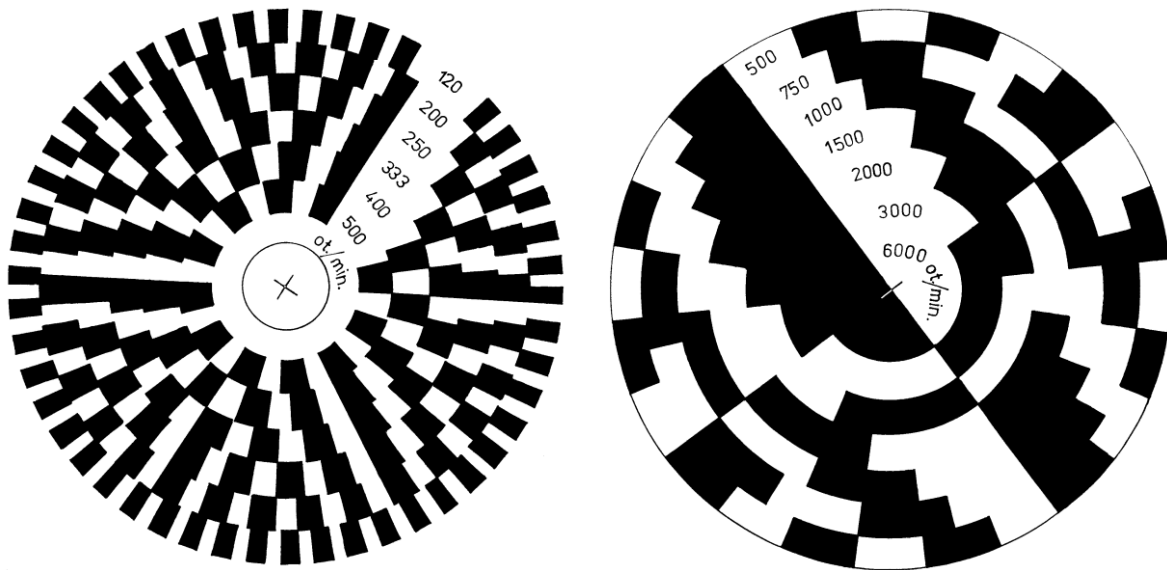


Obr. 55 – Příklady různých typů měřicích stroboskopů, zdroj (Micronix, 2023)

Druhým z principů měření otáček na základě stroboskopického jevu je měření s využitím stroboskopického kotouče, viz obr. 56. Pro tyto kotouče obvykle postačuje osvětlení klasickou žárovkou s nízkým příkonem, zářivkou nebo rtuťovou či sodíkovou výbojkou, které blikají s frekvencí síťového napětí, příp. se použije stroboskop blikající s frekvencí 50 Hz. Mezikruží, u kterých se bude jevit, že jsou nepřerušovaná, se pak jen odečte uvedená hodnota otáček. Bude-li se obrazec mezikruží otáčet ve směru rotace, jsou otáčky nižší než uvedená hodnota a naopak. Budou-li se obrazce na dvou sousedních mezikružích otáčet v navzájem opačném smyslu, leží otáčky mezi uvedenými dvěma hodnotami. Z principu je takové měření spíše přibližné, ale výhodou je jeho jednoduchost a fakt, že není potřeba žádné speciální vybavení.

Stroboskopické kotouče, ale s odlišnými obrazci, než jsou na obr. 56, se v praxi dodnes používají pro přesné nastavení otáček gramofonu. První stroboskopický kotouč za tímto

účelem sestrojil belgický fyzik Joseph Plateau. Spolu s rakouským matematikem a vynálezcem Simonem von Stampferem Plateau již okolo roku 1832 nezávisle objevil stroboskopický efekt, který našel záhy uplatnění ve filmové technice.



Obr. 56 – Stroboskopické kotouče pro různé rozsahy otáček, zdroj (MVE Energetika, 2023)

3 Otázky a úkoly

- 1) Vysvětlete princip činnosti ultrazvukových senzorů polohy. K tomu účelu nakreslete vhodné schéma či graf.
- 2) Jaké jsou základní typy číslicových senzorů polohy a na jakých principech typicky pracují?
- 3) Vysvětlete rozdíl v činnosti BRGC a STGC senzorů. Jaké jsou výhody a nevýhody obou realizací?
- 4) Na čem je založen princip činnosti elektrodynamických otáčkoměrů? Nakreslete schéma asynchronního tachoalternátoru s bubínkovým rotorem.
- 5) Vyjmenujte nejznámější elektrické bezdotykové a impulzní snímače otáček. Na jakém principu fungují snímače stroboskopické?

4 Použitá literatura

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023a. *Absolutní snímače* [online]. [citováno 31. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.balluff.com/cs-cz/products/areas/A0001/groups/G0121/products/F012102>>

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023b. *Optoelektronické snímače vzdálenosti* [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.balluff.com/cs-cz/products/areas/A0001/groups/G0103/products/F01328>>

BALLUFF CZ, s.r.o., 2023c. *Ultrazvukové snímače s analogovým výstupem* [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.balluff.com/cs-cz/products/areas/A0001/groups/G0104/products/F01404>>

BAUMER NV, 2023a. *Counters, position- and process displays: counting of quantities and events, display of position, speed and other measured values* [online]. [citováno 13. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.baumer.com/be/en/product-overview/counters-displays/counters-position-displays-process-displays/c/336>>

BAUMER NV, 2023b. *HeavyDuty tachogenerators and resolvers* [online]. [citováno 13. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.baumer.com/be/en/product-overview/rotary-encoders-angle-sensors/heavyduty-tacho-generators-resolvers/c/318>>

BAUMER NV, 2023c. *Radar sensors: reliable measurements in the most extreme environments* [online]. [citováno 13. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.baumer.com/be/en/product-overview/distance-measurement/radar-sensors/c/291>>

BAUMER NV, 2023d. *Rotary encoders / angle sensors: measuring and monitoring of rotary speed and rotary shaft positions at machines, installations and electrical drives* [online]. [citováno 13. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.baumer.com/be/en/product-overview/rotary-encoders-angle-sensors/c/312>>

BENDA, Tomáš, 2008. *Návrh a realizace bezkontaktního otáčkoměru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 53 s.

BENEŠ, Pavel a kol., 2014. *Automatizace a automatizační technika (3. svazek): prostředky automatizační techniky*. 5. vyd. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-3747-5.

GRAY, Frank, Bell Telephone Laboratories Inc., 1953. *Pulse Code Communication*. Patent US 2632058 z 13. 11. 1947, New York, USA.

HEIDENHAIN, 2023: *LIC 2100 series: absolute linear encoder for simple applications* [online]. [Citováno 31. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.heidenhain.com/products/linear-encoders/exposed/lic-2100>>

HILTGEN, Alain P. a Kenneth G. PATERSON, 2001. Single-Track Circuit Codes. In *IEEE Transactions on Information Theory*. **47**(6). ISSN 2587-2595. DOI: 10.1109/18.945274.

HOTAŘ, Vlastimil, 2019. *Automatizace a robotizace ve strojírenství: přehled, principy a úloha senzorů v automatizaci 1* [online]. [Citováno 7. 2. 2023]. Liberec: TU, Fakulta strojní. Dostupné z WWW: <<https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=437859>>

CHUDÝ, V. a kol., 1999. *Meranie technických veličín*. Bratislava, Vydavateľstvo STU. ISBN 978-80-227-1275-2.

JENČÍK, Josef a Jaromír Volf, 2003. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 978-80-01-02138-6.

KITRONIK Ltd., 2023. *Ultrasonic Distance Sensor HC-SR04 5V Version* [online]. [Citováno 7. 2. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://kitronik.co.uk/products/46130-ultrasonic-distance-sensor-hc-sr04-5v-version>>

KUPKA, Libor, 2022. *Základy mechatroniky: výukový materiál*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

LARM, a. s., 2023. *Optoelektronické inkrementální snímače* [online]. [Citováno 30. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://www.larm.cz/optoelektronicke-inkrementalni-snimace>>

LUFINKA, Aleš, 2022. Snímače pro měření vzdálenosti a posuvu. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec, TU.

MAIXNER, Ladislav a kol. 2006. *Mechatronika*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-1299-3.

MICRO-EPSILON, 2023. *Konfokální snímače vzdálenosti, polohy a tloušťky pro transparentní materiály* [online]. [citováno 27. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor/>>

MICRONIX, 2023. *Bezkontaktní otáčkoměry a stroboskopy* [online]. [citováno 15. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://eshop.micronix.cz/merici-technika/neelektricke-veliciny/otacky-a-rychlost/bezkontaktni-otackomery-a-stroboskopy>>

MVE ENERGETIKA, 2023. *Stroboskopický kotouč* [online]. [citováno 15. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://mve.energetika.cz/uzitecnetabulky/stroboskopicky-kotouc.htm>>

OPKON, 2023a. *Magnetic Incremental Sensors* [online]. [citováno 30. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.opkon.com.tr/en/products/linear-magnetic-encoder/Magnetic%20Incremental%20Sensors>>

OPKON, 2023b. *Rotary Encoder* [online]. [citováno 30. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.opkon.com.tr/en/products/rotary-encoder>>

PLC AUTOMATIZACE, 2023a. *Grayův kód (vícestopý, absolutní)* [online]. [citováno 17. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/gray-code.htm>>

PLC AUTOMATIZACE, 2023b. *Jednostopý Grayův kód (absolutní)* [online]. [citováno 17. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/single-track-gray-code.htm>>

PLC AUTOMATIZACE, 2023c. *Johnsonův kód* [online]. [citováno 17. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/johnson-code.htm>>

PLC AUTOMATIZACE, 2023d. *Kód pro inkrementální snímače* [online]. [citováno 17. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/IRC-code.htm>>

PREMIER FARNELL UK, Ltd., 2023. *Rotační Enkodér Bourns ACE-128* [online]. [citováno 31. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://cz.farnell.com/bourns/eaw0j-b24-ae0128l/encoder-rotary-128pos-8-bit/dp/9358234>>

REDHUNTER, 2022. *Inside the Bourns ACE-128 Absolute Encoder* [online]. [citováno 31. 5. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://redhunter.com/blog/2017/11/25/inside-the-bourns-ace-128-absolute-encoder/>>

RIDEX, GmbH, 2021. *RPM Sensor, automatic transmission* [online]. [citováno 15. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://en.ridex.eu/catalog/sensors/rpm-sensor-automatic-transmission>>

ROBODOUPĚ, 2018. *Micro:bit a sonar: princip detekce překážek ultrazvukem* [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://robodoupe.cz/2018/microbit-a-sonar/>>

SCHMID, Dietmar a kol. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 1. vyd. Překlad Jiří Handlíř. Praha: Europa-Sobotáles, 2005, 420s. ISBN 978-80-86706-10-9.

SENSIT s.r.o, 2022. *Indukční snímače otáček* [online]. [citováno 15. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.sensit.cz/cz/kategorie/indukcni-snimace-otacek-20729/>>

SPEDDING, Norman Bruce, Industrial Research Limited, 1994. *A position encoder*. Patent NZ 264738 z 28. 10. 1994, Nový Zéland.

VOJÁČEK, Antonín, 2005. Ultrazvukové senzory přiblížení. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 25. 4. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2005110201>>

WINSTON ELECTRIC Co., Ltd., 2023. *Z96-F Meter counter* [online]. [citováno 13. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.cnwinston.com/Z96-F-Meter-counter-pd514289.html?searchValue=Z96-F%20Meter%20counter>>

Seznam zkratk

ABS	anti-lock brake system (protiblokovací systém)
ARC	absolute rotary coder (absolutní rotační kodér)
BRGC	binary reflected Gray code (zrcadlový Grayův kód)
CCD	charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji, snímací technika)
ČVUT	České vysoké učení technické
FMCW	frequency modulated continuous wave (frekvenčně modulovaná spojitá vlna)
HTL	high-threshold logic (24voltová)
IRC	incremental rotary coder (inkrementální rotační kodér)
LC	indukčně-kapacitní

LED	light emitting diode (světlo emitující dioda)
STGC	single track Grey code (jednostopý Greyův kód)
ToF	time of flight (doba letu)
TTL	transistor-transistor-logic (tranzistorově-tranzistorová logika, 5voltová)
TU	technická univerzita
USA	United States of America
VIS	viditelné spektrum
μP	mikroprocesor

Rejstřík

elektronický stroboskop, 34
 enkodér. viz inkrementální číslicový senzor
 Grayův kód, 1, 12, 13, 15, 37, 38
 jednostopý STGC, 13, 14, 39
 vícestopý zrcadlový BRGC, 13, 14, 38
 Johnsonův kód, 13
 Libaw-Craigův kód. viz Johnsonův kód
 otáčkoměr. viz senzor otáček
 piezoelektrický měnič, 2
 senzor otáček, 18
 elektrický bezdotykový a impulzní, 18, 25
 ARC, 1, 19, 25, 26, 32, 38
 indukční, 27, 28
 indukčnostní, 27
 IRC, 1, 18, 25, 26, 32, 37, 39
 kapacitní, 26
 optický speciální
 impulsní laserový, 33
 s modulací optické cesty, 32
 s Halloovou sondou, 29
 s jazýčkovými kontakty, 30
 s Wiegandovým jevem, 29, 30
 stroboskopický, 19, 33, 35
 elektrický spojitý, 18, 21
 elektrodynamický, 21
 tachalternátor, 1, 21, 22, 23, 24
 asynchronní, 24
 asynchronní s bubínkovým rotorem, 23, 24
 synchronní, 23
 tachodynamo, 18, 21, 22

- unipolární dynamo, 22, 23
- magnetoindukční, 25
- mechanický, 19
- odstředivý, 18, 20
 - hydraulický (tachograf), 20
 - mechanický Wattův, 20
- senzor polohy, 1
 - číslicový
 - inkrementální, 8, 12, 18
 - s prostorovým kódem, 12, 13, 15, 19
 - číslicový, 8
 - elektrický bezdotykový a impulzní
 - optický speciální, 32
 - s vířivými proudy, 31
 - optoelektrický, 4
 - konfokálně chromatický, 6, 7
 - triangulační, 4
 - radarový, 16, 17
 - ultrazvukový, 1, 2, 3, 4, 16, 36, 38
- stroboskopický efekt. viz stroboskopický jev
- stroboskopický jev, 34
- stroboskopický kotouč, 9, 10, 14, 19, 30, 31, 34, 35
- tachogenerátor. viz tachoalternátor
- Time of Flight, 16
- ToF. viz Time of Flight
- Wiegandův drát, 29
- Wiegandův jev, 19, 29

Měření neelektrických veličin

Téma 9: Měření zrychlení

Studijní cíl

Základní principy piezoelektrických, piezorezistivních a tenzometrických senzorů zrychlení klasické konstrukce a principy piezorezistivních, kapacitních a tepelných MEMS senzorů zrychlení.

Doba nutná k nastudování

2 hodiny

Klíčová slova

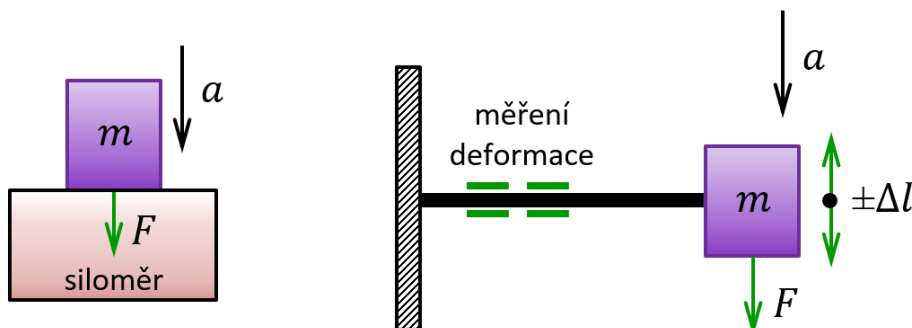
Zrychlení, akcelerometr, seismická hmota, piezoelektrický jev, piezorezistivita, tenzometr, MEMS senzor, frekvenční charakteristika

1 Akcelerometry

Základní princip měření zrychlení je založen na vyhodnocování setrvačných účinků těles při jejich urychlování nebo zpomalování. Využívá se přitom Newtonův zákon, podle něhož pro zrychlení platí vztah

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

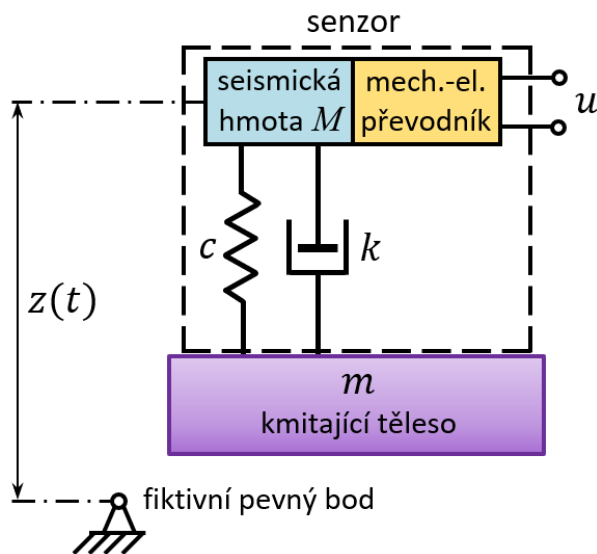
K měření zrychlení se používají snímače zrychlení – akcelerometry.



Obr. 1 – Princip měření zrychlení

Akcelerometry jsou senzory určené k měření statického nebo dynamického zrychlení. Přeměňují zrychlení (neelektrickou veličinu) na měřitelný elektrický signál. Mohou být jedno-

až třiosé. Nejčastěji se měření zrychlení převádí na **měření síly** (základní principy jsou na obr. 1) prostřednictvím elektromechanického měniče, jehož výstupní napětí je úměrné působící síle, nebo na **snímání polohy**.



Obr. 2 – Základní princip snímače zrychlení

Dle realizace nehybného bodu, vůči němuž se stanovují parametry kmitů tělesa, rozlišujeme dvě skupiny snímačů – relativní (pevný bod vně snímače) a absolutní (uvnitř snímače se za určitých dynamických podmínek vytvoří nehybný bod – tzv. seismická hmota, viz také obr. 2).

Snímání síly potom může být založeno na principu **piezorezistivním**, **tenzometrickém**, **piezoelektrickém**, **kapacitním**, nejnověji také **tepelném** a snímače mohou být provedeny také jako **jednočipové** (MEMS). Snímání polohy je v současnosti většinou **kapacitní**, příp. indukční nebo indukčnostní.

1.1 Sensory zrychlení klasické konstrukce

Akcelerometry klasické konstrukce jsou nejčastěji založeny na piezoelektrickém jevu. Tyto snímače mají mnoho předností, např.: jsou spolehlivé, mají dlouhodobě stabilní parametry, široký frekvenční rozsah, velkou citlivost a celkově pevnou a robustní konstrukci.

Jedná se o snímače aktivní, neboť generují elektrický náboj, který se následně převádí na napětí. Jejich největší nevýhodou je fakt, že nedokáží měřit statické zrychlení, resp. zrychlení o velmi nízkých frekvencích. Ty nejlepší snímače měří od 0,1 Hz, ale spíše od 0,5 Hz výše.

Mezi klasické snímače zrychlení lze zařadit i snímače založené na jiných fyzikálních principech. Nejčastěji se jedná o snímače kapacitní, odporové, rezonanční, akustické nebo tepelné. Uvedené typy snímačů se ale využívají, především z důvodu své složitosti a mnohdy i vyšší ceny, spíše ve speciálních případech, ve kterých nelze snímače piezoelektrické použít.

1.1.1 Piezoelektrické

U těchto senzorů se využívá přímý piezoelektrický jev (z řeckého piezein – tlačit), který zjednodušeně řečeno spočívá ve schopnosti krystalu generovat napětí při deformaci. Je možné vyskytovat jen u nesymetrických krystalů, např. u monokrystalického křemene (oxid křemičitý SiO_2), resp. křišťálu, viz také obr. 3. Poprvé byl však jev pozorován u krystalu tzv. Seignettovy soli (tetrahydrát vinanu draselno-sodného $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$). Přímý piezoelektrický jev byl objeven bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými již v roce 1880. Za přispění francouzského fyzika Gabriela J. Lippmanna byl v následujícím roce objeven také nepřímý piezoelektrický jev.



Obr. 3 – Křemenný krystal SiO_2 a realizované kruhové výbrusy různé velikosti, zdroj (Kistler Group, 2023)

Přibližně až do roku 1917 nebyl o využití piezoelektrického jevu příliš zájem. Prakticky až se začátkem 1. sv. války našel první významné uplatnění v sonaru při odhalování ponorek. Rozsáhlé využití jevu pak přišlo okolo roku 1940 během 2. sv. války. Nejdříve v souvislosti s novými materiály pro výrobu kondenzátorů na bázi spékaných prášků oxidů kovů. S tím souvisel prudký rozvoj elektrotechniky a elektroniky obecně (krystalové rezonátory, frekvenční filtry, mikrofony a akcelerometry). Později, v šedesátých letech 20. století, byla objevena piezokeramika (titaničitan barnatý BaTiO_3 , zirkoničitan olovnatý PbZrO_3 a titaničitan olovnatý PbTiO_3).

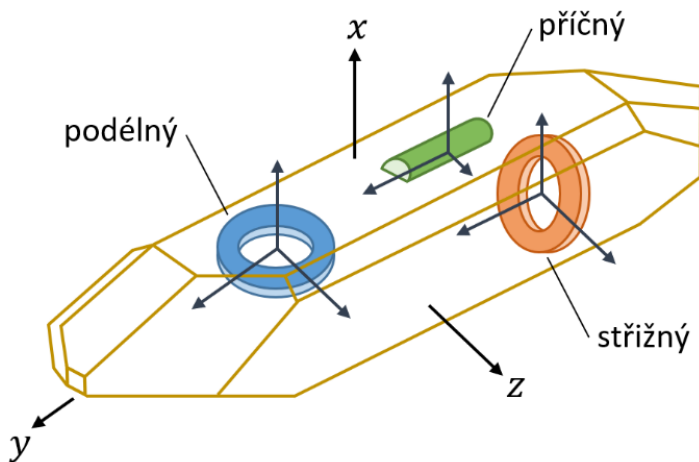
Jak již bylo řečeno, tak krystal, který má vykazovat piezoelektrický jev, nesmí mít střed symetrie. Pokud není deformován, jsou jeho náboje rozmístěny symetricky a celkový povrchový náboj je nulový. Při deformaci piezoelektrického krystalu se ionty opačných nábojů posunou v krystalické mřížce takovým způsobem, že elektrická těžiště kladných a záporných iontů se od sebe navzájem vzdálí a na určitých místech krystalu se objeví elektrický náboj, který vyvolá vznik elektrického pole v krystalu.

Při obráceném piezoelektrickém jevu, tzv. elektrostrikcii, dochází působením vnějšího elektrického pole k posunutí iontů a to vede k deformaci krystalu. Obrácený jev má pak využití u velmi přesných aktuátorů (akčních členů).

Připomeňme, že při deformaci krystalické mřížky vlivem vnější síly, dochází také ke změně elektrické vodivosti (konduktivity), což se označuje jako piezorezistivní jev (viz také studijní opora Tenzometry 1).

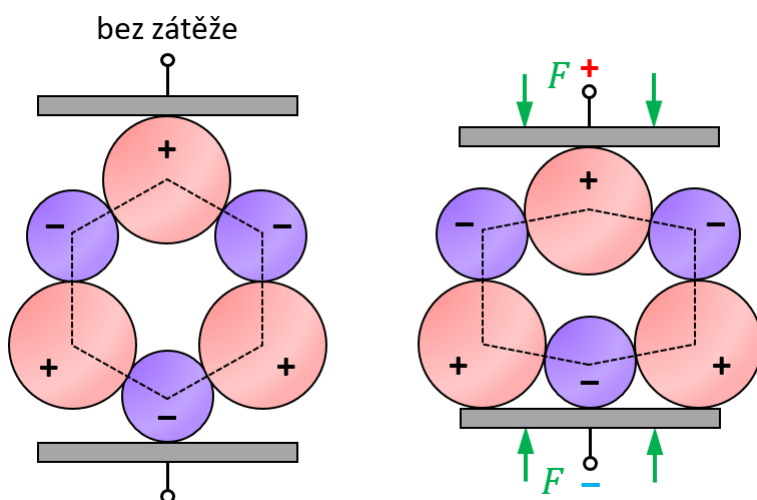
Při vysokých teplotách již dochází ke ztrátě piezoelektrických vlastností materiálu, protože dochází k narušení iontového uspořádání v krystalické mřížce. Dochází k tomu skokově a přechodová teplota T_C , při níž ke ztrátě piezoelektrických vlastností dochází, charakteristická pro daný konkrétní materiál, se nazývá Curieova. Např. pro SiO_2 je $T_C = 576 \text{ }^\circ\text{C}$, pro BaTiO_3 je $T_C = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, pro PbZrO_3 je $T_C = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ a pro PbTiO_3 je $T_C = 470 \text{ }^\circ\text{C}$.

Praktických způsobů vyvození piezoelektrického napětí je několik. Budeme-li uvažovat krystal na obr. 3, resp. jeho schéma na obr. 4, lze vytvořením odpovídajícího výbrusu uvažovat o podélném, střížném nebo příčném piezoelektrickém jevu.



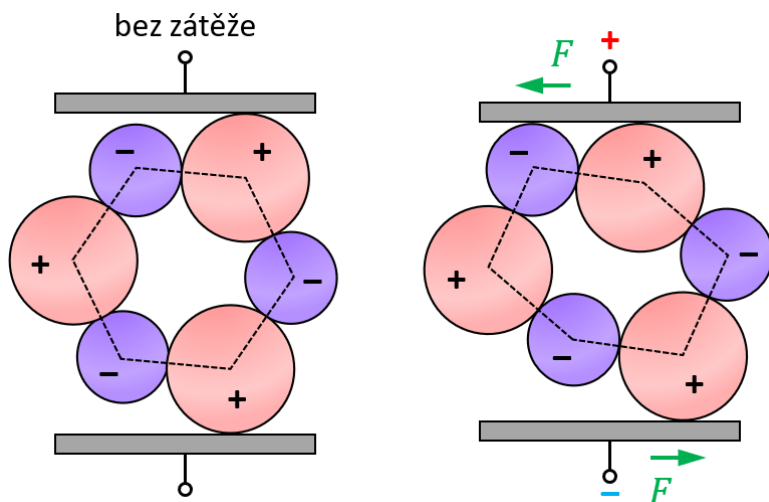
Obr. 4 – K ilustraci základních způsobů vzniku piezoelektrického efektu, odpovídající výbrusy krystalu, zdroj autor dle (Kistler Group, 2023) a (Lufinka, 2012)

Princip vzniku piezoelektrického napětí je pro základní tři způsoby deformace názorně demonstrován na obr. 5 (podélný, longitudinal), obr. 6 (střížný, shear) a na obr. 7 (příčný, transversal). Při příslušném zatížení se na elektrodách objeví kladný, resp. záporný náboj.

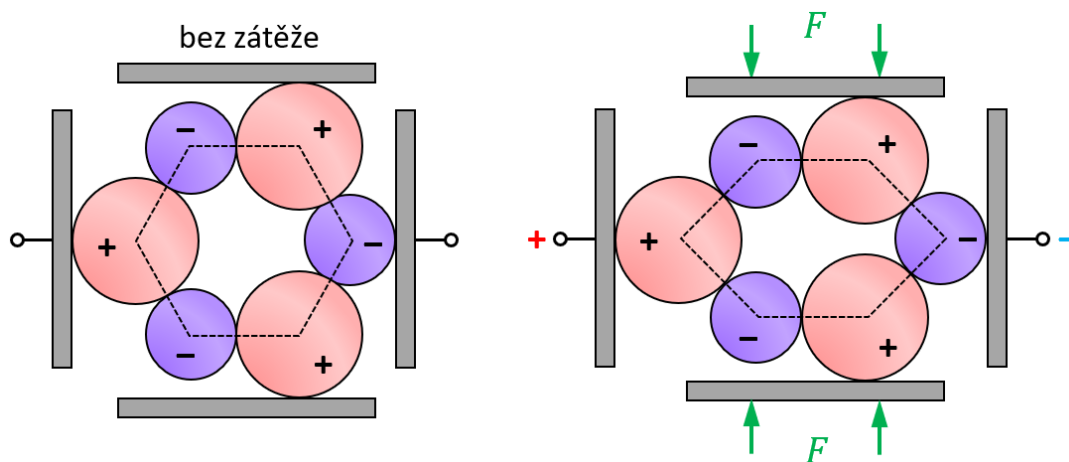


Obr. 5 – Schéma principu vzniku podélného (longitudinal) piezoelektrického efektu, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)

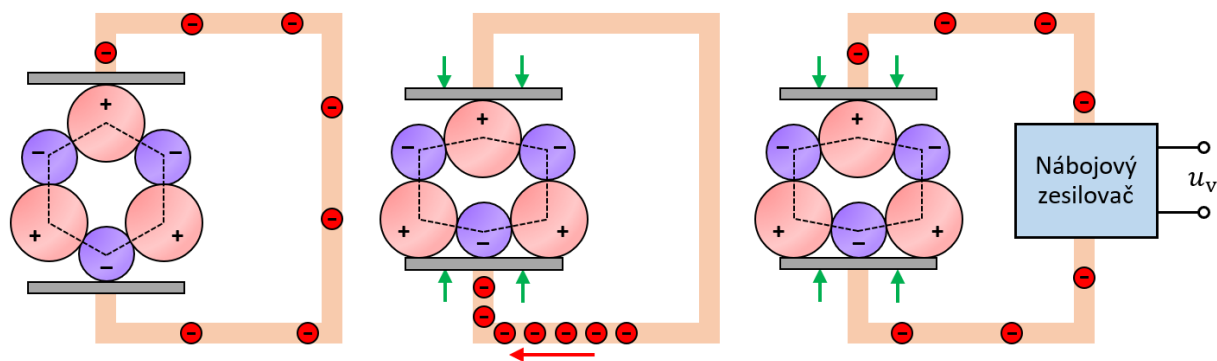
Prakticky, pokud protilehlé plochy krystalu propojíme vodičem (obr. 8), tak po deformaci krystalu a následném generování náboje se ve vodiči objeví uspořádaný pohyb elektronů (elektrický proud). Po vyrovnání náboje pohyb elektronů ustane, takže proud protéká jen při změně náboje (změně zatížení). Snímače zrychlení, síly i jiných veličin, na bázi piezoelektrického jevu nemohou tedy měřit při statickém zatížení.



Obr. 6 – Schéma principu vzniku střížného (shear) piezoelektrického efektu, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)

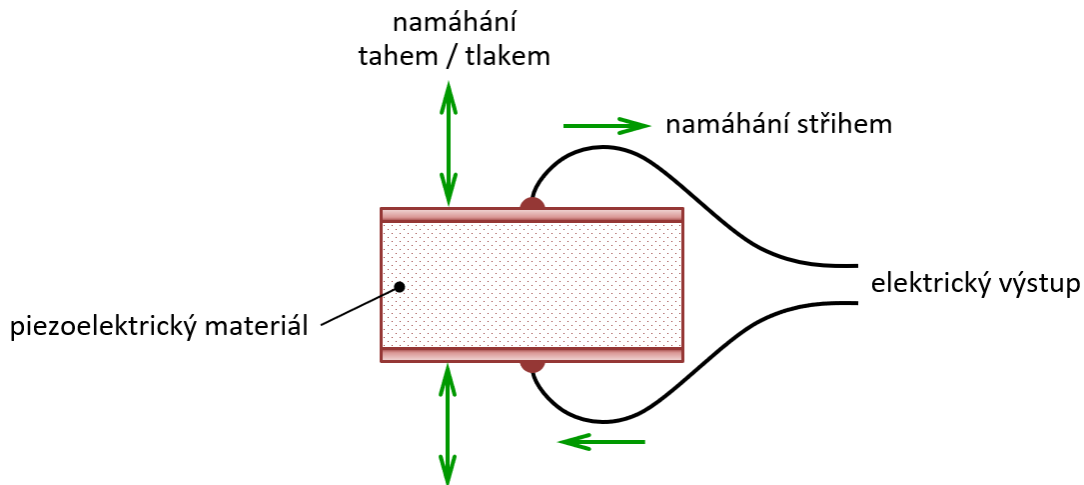


Obr. 7 – Schéma principu vzniku příčného (transversal) piezoelektrického efektu, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)



Obr. 8 – Ilustrace vzniku piezoelektrického napětí, zdroj autor dle (Lufinka, 2012)

Historie piezoelektrických snímačů sahá až do 2. sv. války, kdy došlo k prudkému rozmachu elektrotechniky a W. Kistler se začal zabývat použitím piezoelektrických krystalů při měření tlaku. Firma Kistler Instruments, kterou později v USA založil, vyvinula mj. první nábojový zesilovač. První komerčně prodáváný piezoelektrický akcelerometr byl uveden spol. Brüel & Kjær na trh v roce 1943. Jednalo se o snímač, využívající piezoelektrického jevu ve výbrusu krystalu Rochelleské soli. V USA v roce 1950 spol. Gulton Corporation vyvinula snímač moderní, dodnes používané konstrukce, s možností kotvení šroubem, založený na piezokeramickém materiálu. Tzv. PZT keramika poté nahradila ve snímačích do té doby běžně používané krystaly.



Obr. 9 – Možnosti mechanického namáhání PZT keramiky, zdroj autor dle (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

Základem piezoelektrického akcelerometru je výřez z piezoelektrického materiálu – většinou z uměle polarizované piezoelektrické keramiky (téměř výhradně olovo-zirkon-titanát – tzv. PZT keramika, viz výše). Při jejím mechanickém namáhání tahem, tlakem nebo střihem, viz obr. 9, vzniká na základě piezoelektrického jevu el. náboj. Součástí snímače musí být nábojový zesilovač. Měření náboje probíhá buď pomocí externích elektronických obvodů s vysokou vstupní impedancí nebo častěji přímo pomocí vnitřní elektroniky snímače. Ta elektrický náboj převádí na napěťový nízkoimpedanční výstup. Snímače mají relativně jednoduchou konstrukci, takže je postačuje připojit k jednoduchému vyhodnocovacímu obvodu.

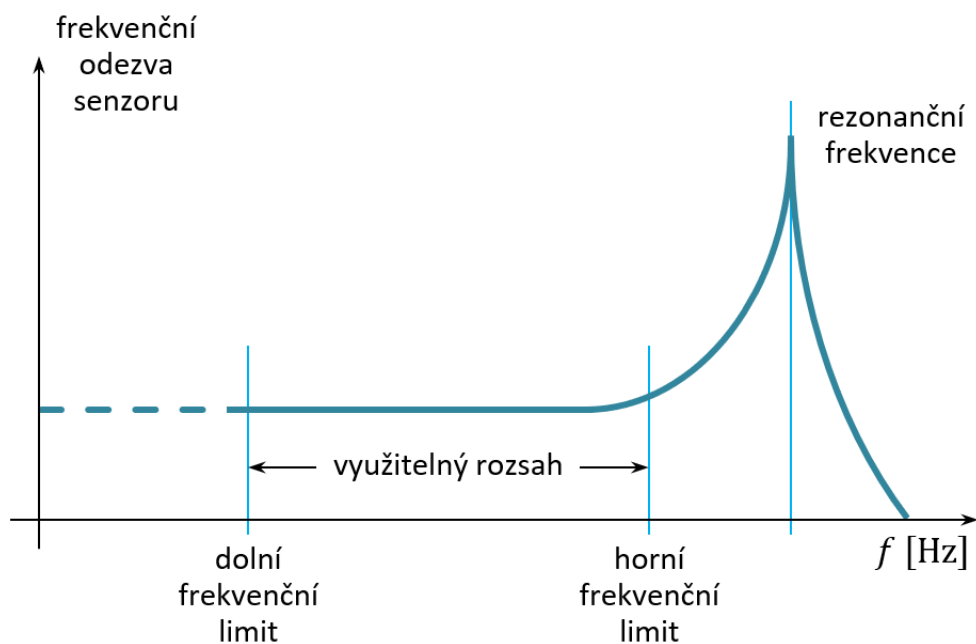
PZT keramika je z jedné strany upevněna k základně snímače a na ní je pak umístěna setrvačná (seismická) hmota. Na PZT keramiku působí při kmitavém pohybu síla, která je úměrná zrychlení setrvačné hmoty, viz vztah (1) výše. Ta je k PZT keramice přitlačena pružinou, aby se při působení vibrací neuvolnila. Je-li senzor pevně připevněn k testovanému objektu, měří pak zrychlení celé soustavy a lze tak zjistit zrychlení objektu. Senzor lze charakterizovat **nábojovou citlivostí (2)**

$$B_{Qa} = \frac{Q}{a} \quad (2)$$

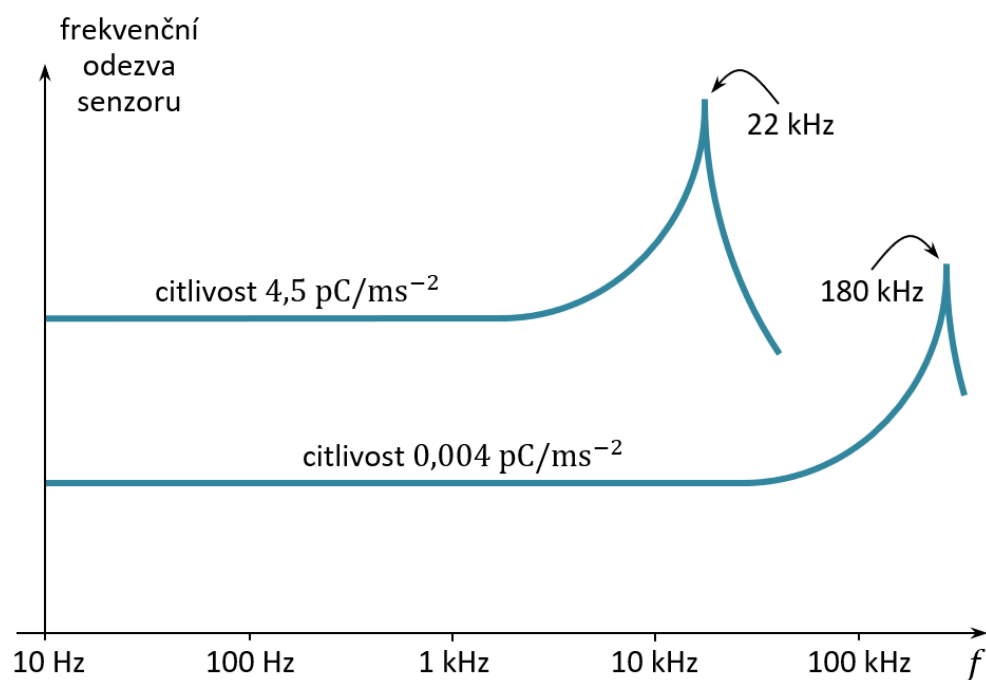
případně napěťovou citlivostí (3)

$$B_{Ua} = \frac{U}{a} \quad (3)$$

Snímač je použitelný pro frekvence nižší, než je rezonanční frekvence seismické hmoty a pružiny (obr. 10). Nejčastěji se používají dvě varianty snímačů – tlakového nebo střížného typu, viz obr. 12 a obr. 15.



Obr. 10 – Amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrických akcelerometrů s vyznačením využitelného rozsahu, zdroj autor dle (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

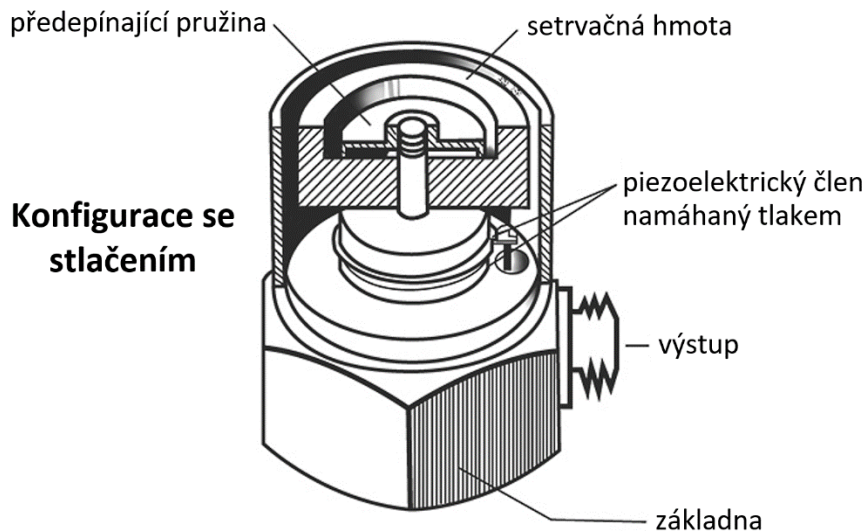


Obr. 11 – Amplitudová frekvenční charakteristika piezoelektrických akcelerometrů: snížení citlivosti při posunu rezonančního převýšení, zdroj autor dle (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

Snímač lze považovat za dolnofrekvenční propust s rezonančním převýšením, které představuje zároveň horní mez použitelného frekvenčního rozsahu. Zvýšení této meze, tj. posunutí převýšení směrem k vyšším frekvencím, lze dosáhnout zmenšením seismické hmoty.

To ale vede ke snížení citlivosti snímače, viz obr. 11. Konkrétní snímač je tedy nutné volit s ohledem na tyto skutečnosti podle reálné potřeby měřit s vyšší citlivostí menší hodnoty zrychlení nebo naopak vyšší hodnoty zrychlení, ale se sníženou citlivostí.

Nejběžnější jsou akcelerometry pracující **v konfiguraci se stlačováním** (v tlakovém, resp. kompresním módu, compression mode, viz obr. 12). Vyznačují se jednoduchou konstrukcí, velkou tuhostí a dlouhodobou spolehlivostí. Jsou dobře dostupné a nejčastěji se využívají v nejrůznějších odvětvích lehkého i těžkého průmyslu k detekci stavu strojů a jejich částí, i při dlouhodobém testování jejich správné funkce.

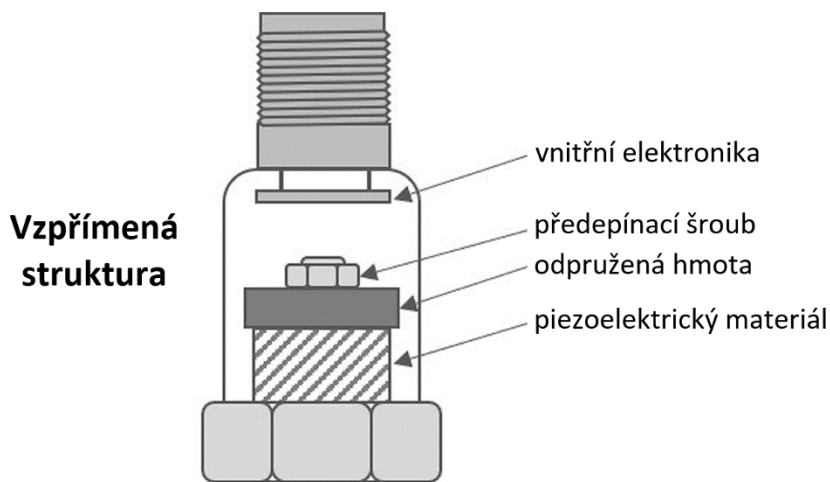


Obr. 12 – Konstrukční schéma piezoelektrického akcelerometru v konfiguraci se stlačením, upraveno dle (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

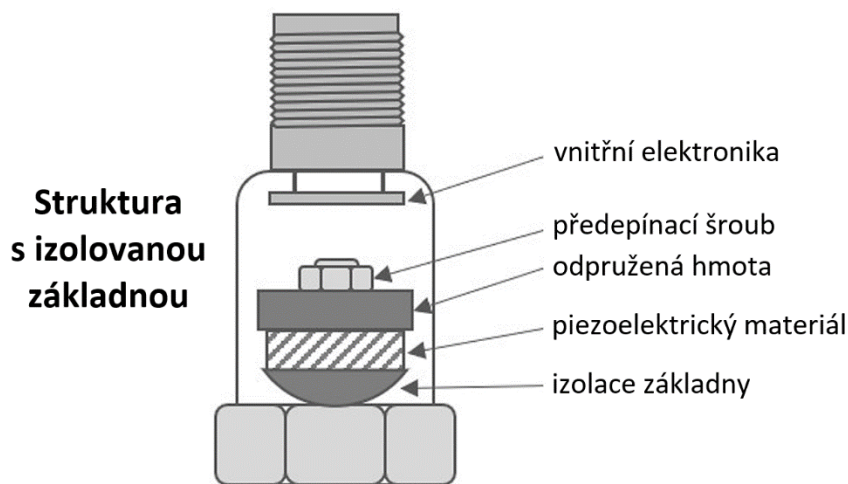
Zároveň se používají tři základní konstrukční struktury snímačů. První z nich je **základní (vzpřímená) struktura** (upright compression-mode accelerometer, obr. 13) v níž je vrstvená PZT keramika umístěna mezi seismickou hmotou a základnou. Vzájemné spojení je realizováno pomocí šroubu nebo speciálního spojovacího prvku. Výhodou je možnost použití větších seismických hmot a dostatečná tuhost konstrukce, což umožní měření vyšších frekvencí (běžně desítky kHz), velkých hodnot zrychlení (až 50 000 G, pozn.: $G = 9,81 \text{ ms}^{-2} \approx 10 \text{ ms}^{-2}$) a vysoké krátkodobé přetížení. Snímač je ale velmi citlivý na změny teploty a ohyb pouzdra.

Převrácená struktura (inverted compression-mode accelerometer) zajistí eliminaci styku PZT keramiky se základnou, na níž je v této konfiguraci umístěna seismická hmotka. Snímač se pak vyznačuje vyšší teplotní stabilitou, je velmi přesný a často se využívá ke kalibraci jiných snímačů zrychlení.

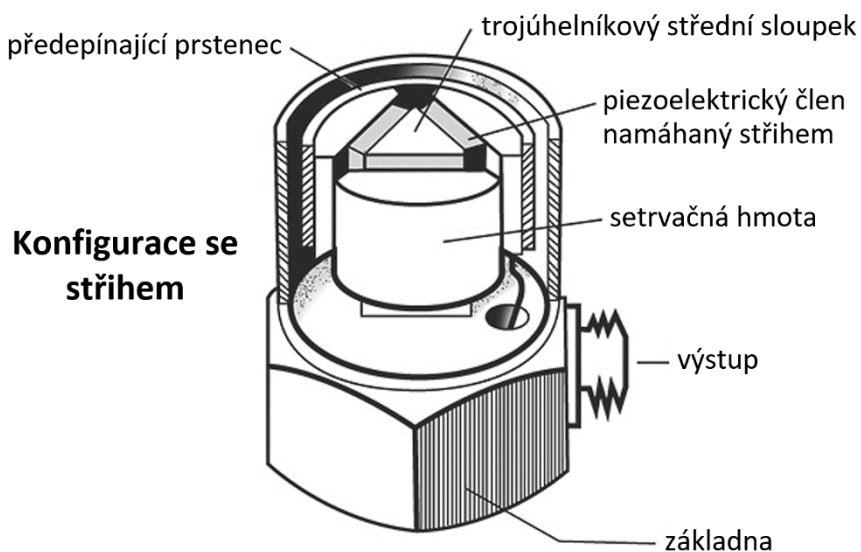
Izolovaná struktura (isolated compression-mode accelerometer, obr. 14) řeší problém styku PZT keramiky a základny snímače použitím izolačního prvku, resp. prvku se zmenšenou montážní plochou, a často také použitím duté seismické hmoty pro lepší tepelnou stabilitu a eliminaci vlivu mechanických změn základny.



Obr. 13 – Vzpřímená struktura akcelerometru v konfiguraci se stlačováním, upraveno dle (McMillen, 2023)

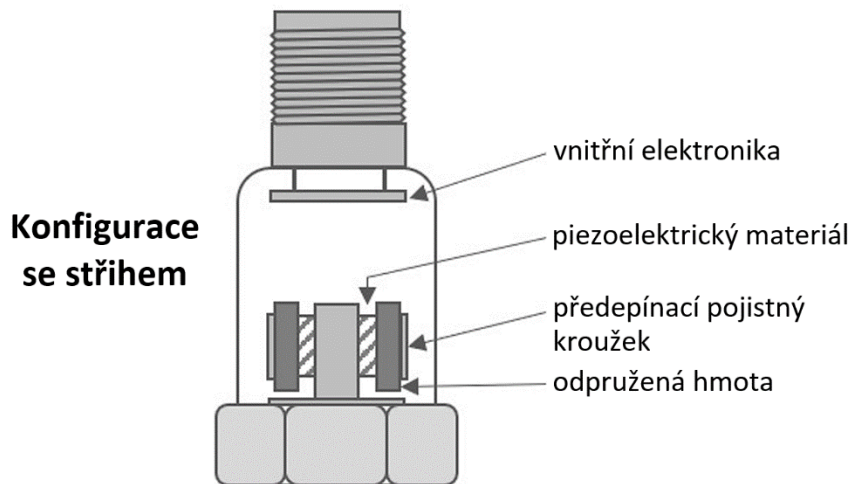


Obr. 14 – Struktura akcelerometru s izolovanou základnou v konfiguraci se stlačováním, upraveno dle (McMillen, 2023)



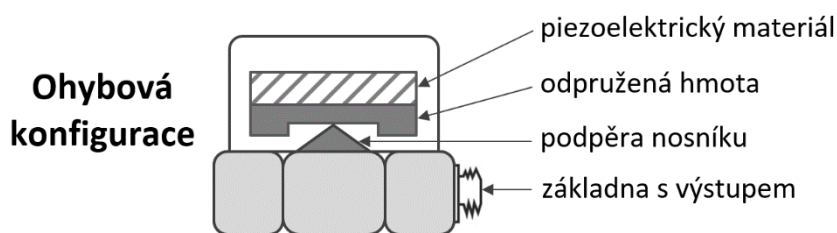
Obr. 15 – Konstrukční schéma piezoelektrického akcelerometru v konfiguraci se stříhem, upraveno dle (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

Akcelerometry pracující v **konfiguraci se stříhem** (ve střížném, resp. smykovém módu, shear mode) využívají seismickou hmotu realizovanou v podobě kompresního kroužku (obr. 16) nebo sloupku (obvykle trojúhelníkového, obr. 15) a upevněnou na horizontálně umístěném centrálním nosníku. Výhodou této struktury je vyšší nábojová citlivost, praktická eliminace tepelných přechodů směrem od základny, i vlivu mechanického ohybu základny.



Obr. 16 – Struktura akcelerometru ve střížné konfiguraci, upraveno dle (McMillen, 2023)

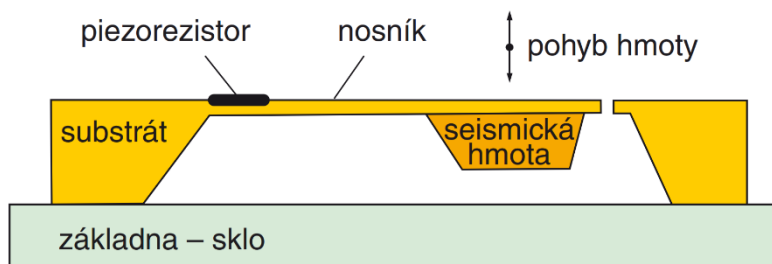
Další skupinu tvoří akcelerometry pracující v **konfiguraci s ohybem** (v ohybovém módu, flexural mode, obr. 17). Jsou tvořeny PZT keramikou, která přímo tvoří nosník nebo může být umístěna na nosníku (podeřřeném nebo jednostranně vetknutém). Konfigurace se vyznačuje necitlivostí na příčný pohyb. Snímač je kompaktní, s nízkým profilem a nízkou hmotností. Výhodou je vyšší citlivost a možnost použití pro nízké frekvence (statické zrychlení jím ale měřit nelze). Nevýhodou je ale velmi malá odolnost snímače vůči přetížení.



Obr. 17 – Akcelerometr v konfiguraci s ohybem, zdroj autor dle (McMillen, 2023) a (Hottinger Brüel & Kjær, 2023)

1.1.2 Piezorezistivní

U piezorezistivních akcelerometrů se nejčastěji měří deformace (ohyb) vetknutého nosníku se seismickou hmotou (základní princip na obr. 1, zjednodušené konstrukční schéma na obr. 18). K tomu se využívají piezorezistory, které pracují na základě piezorezistivního jevu, tj. změny elektrického odporu v závislosti na deformaci polovodičového krystalu. Piezorezistivní snímače jsou zapojeny v polovičním, nebo častěji v úplném Wheatstoneově můstku a jsou umístěny blízko pevného konce nosníku, kde vzniká největší mechanické napětí.



Obr. 18 – Konstrukce piezorezistivního akcelerometru, zdroj (Husák, 2008)

Tyto akcelerometry jsou obvykle řešeny jako integrované obvody, přičemž jejich základem je síť leptaných piezorezistivních snímačů zapojených v můstku. Piezorezistivní snímače dokáží na rozdíl od snímačů piezoelektrických měřit i statické zrychlení. Při nízkých frekvencích dochází ale k velkému zatížení šumem a další nevýhodou je i značná teplotní závislost snímačů, kterou je vhodné kompenzovat.

1.1.3 Tenzometrické

Tento typ akcelerometrů je založen na detekci vychýlení seismické hmoty pomocí křemíkových nebo fóliových tenzometrů. Tenzometry jsou nejčastěji zapojeny do úplného můstku. Princip činnosti, i základní vlastnosti jsou obdobné jako u snímačů piezorezistivních. Rozsah zrychlení je u těchto snímačů od jednotek G až po cca 2000 G. Důležitou a bohužel často opomíjenou vlastností snímačů zrychlení je jejich frekvenční rozsah. U tenzometrických snímačů je od 0 Hz až do 4 kHz. Lze tedy měřit i statické zrychlení, stejně jako u snímačů piezorezistivních. Značnou výhodou je také velká přetížitelnost, snímače vydrží puls o velikosti až 8000 G.

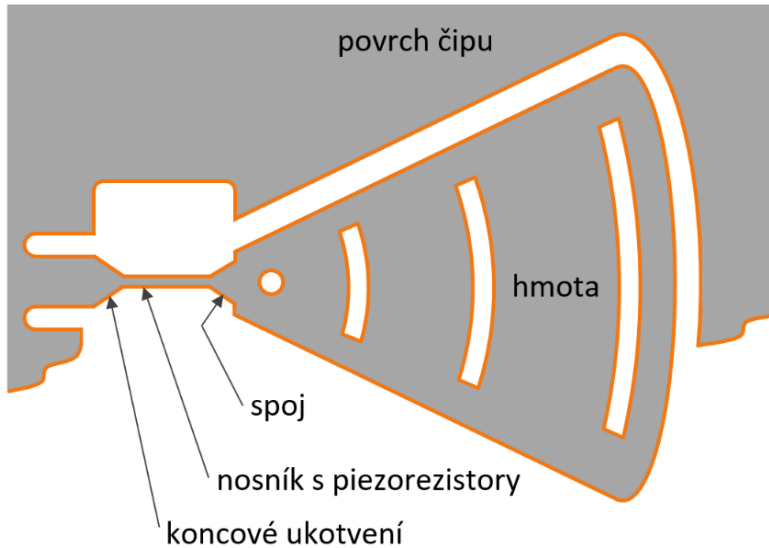
1.2 MEMS senzory zrychlení

Moderní postupy výroby akcelerometrů technologií MEMS přináší v posledních letech nové možnosti měření zrychlení s velmi dobrou přesností a zároveň s možností integrace senzorů do kompaktních pouzder integrovaných obvodů. Měření deformace seismické hmoty se realizuje pomocí piezorezistorů, tenzometrů, nebo na kapacitním či tepelném principu. Pružný člen, kmitající seismická hmota, piezorezistory nebo polovodičové tenzometry, elektrody kapacitoru i zesilovač jsou umístěny v jednom čipu. Snímače tohoto typu se často označují jako jednočipové.

1.2.1 Piezorezistivní MEMS

Prvními snímači vyráběnými v MEMS provedení byly snímače piezorezistivní. V dnešní době jsou ale z důvodu vysoké teplotní citlivosti a zatížení šumem vytlačovány snímači kapacitními a nově také tepelnými. Snímače nejsou zdrojem energie, jsou pasivní a potřebují tedy napájení. Jak již bylo uvedeno, tak se u nich využívá změny odporu piezorezistivního materiálu

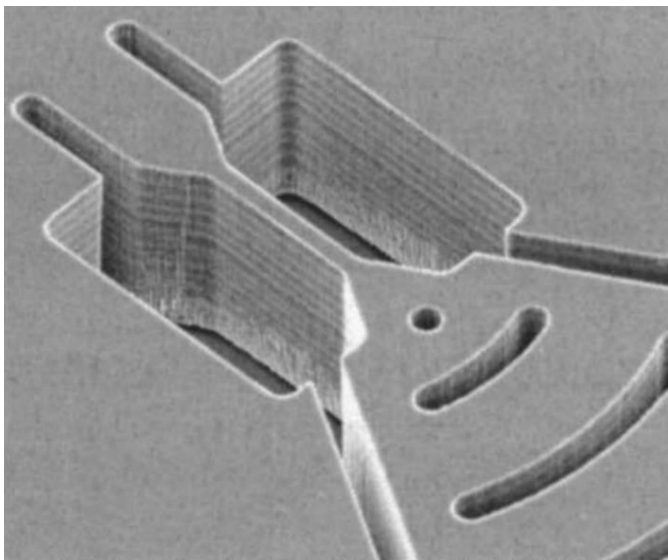
vlivem mechanického namáhání (nejčastěji jde o ohyb). Mezi novější konstrukční varianty patří tzv. rovinný akcelerometr (obr. 19 a obr. 20), u něhož se využívá připevnění jednotlivých částí setrvačné hmoty ve tvaru kruhových výsečí pomocí ohebných nosníků k pouzru snímače.



Obr. 19 – Schéma provedení rovinného piezorezistivního akcelerometru, zdroj autor dle (Vojáček, 2007b) a (Lynch, 2023)

Uvedené konstrukční řešení zabraňuje nadměrnému vyosení seismické hmoty, které by způsobovalo nelinearitu a hrozilo by i poškození snímače při přetížení v podobě pulzu zrychlení.

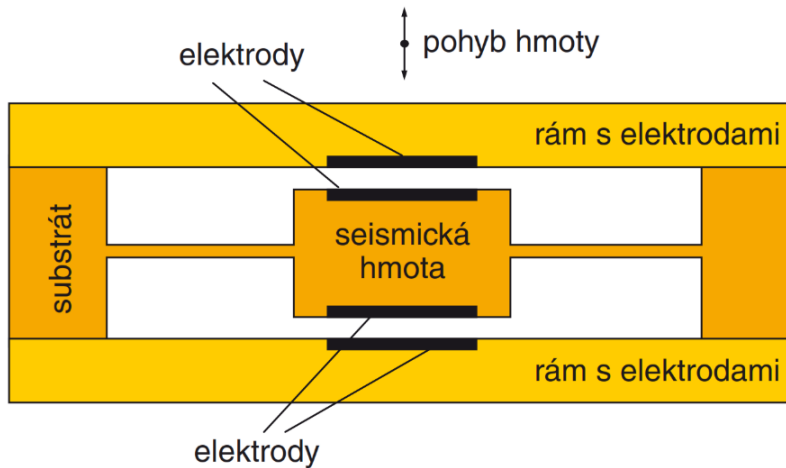
Výše zmiňovaná velká teplotní citlivost snímače je způsobena zejména teplotní závislostí piezorezistivní vrstvy aplikované na nosníku (obdobné je to i při použití tenzometrů). Změna teploty totiž způsobí i změnu elektrického odporu vrstvy. Problematická je také teplotní roztažnost nosníku a s tím související změna jeho tuhosti.



Obr. 20 – Reálné provedení rovinného piezorezistivního akcelerometru – fotografie z elektronového mikroskopu, zdroj (Lynch, 2023)

1.2.2 Kapacitní MEMS

U tohoto typu snímačů se využívá změny kapacity vyvozené vychýlením seismické hmoty, která tvoří pohyblivou elektrodu deskového kondenzátoru. Působí-li na snímač zrychlení, hmota se vychyluje a tím dochází ke změně vzdálenosti elektrod a tím i ke změně kapacity. Změna kapacity je detekována vnitřní elektronikou, která je integrována na jednom čipu.

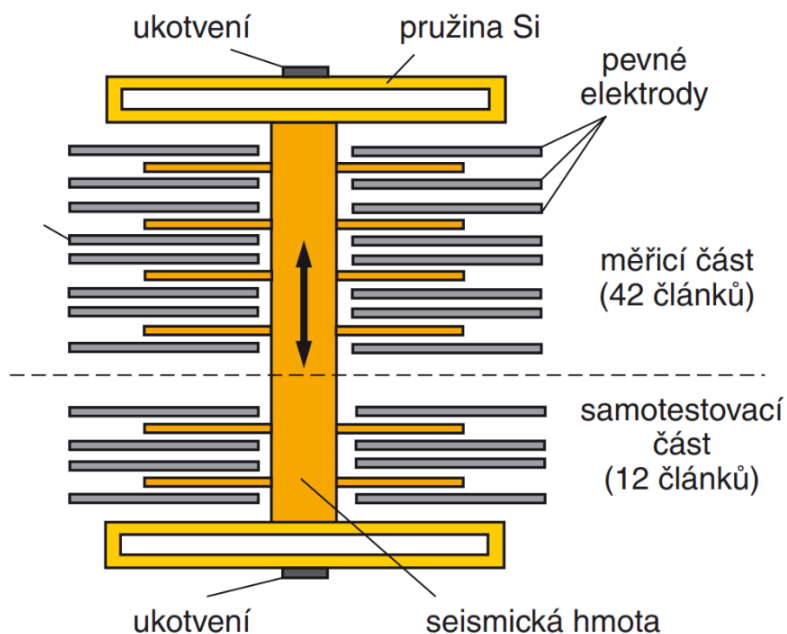


Obr. 21 – Principiální schéma kapacitního MEMS akcelerometru, zdroj (Husák, 2008)

Pro kapacitu deskového kondenzátoru platí známý vztah

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (4)$$

z něhož plyne, že při změně vzdálenosti desek d , je závislost kapacity C na této změně nelineární. K částečné kompenzaci této nelinearity se využívá diferenčního zapojení elektrod, viz obr. 21.



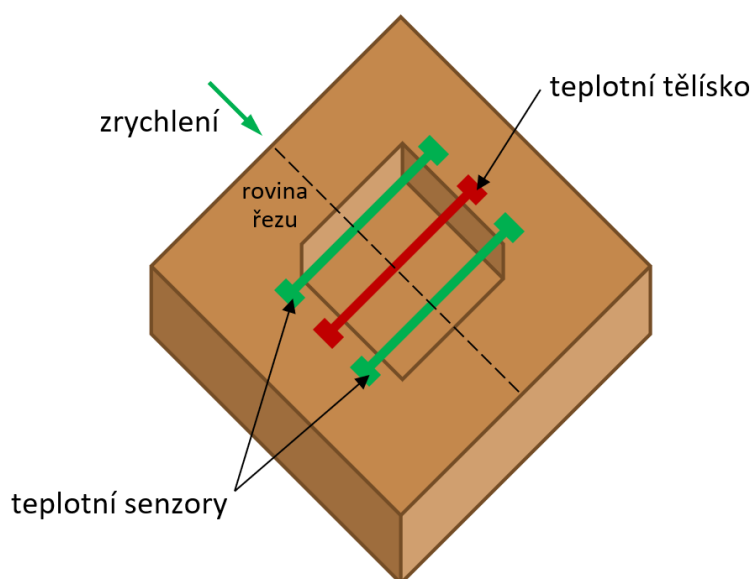
Obr. 22 – Hřebenové uspořádání jednoosého kapacitního MEMS akcelerometru, zdroj (Husák, 2008)

Kapacitní MEMS akcelerometry se nejčastěji vyrábí v tzv. hřebenovém provedení (obr. 22), jehož součástí je několik desítek diferenčních kondenzátorů. Toto technologické řešení, dobře aplikovatelné v MEMS technologii výroby, přináší především vyšší citlivost a teplotní stabilitu snímače. Část kondenzátorů v diferenčním zapojení se obvykle využívá k autodiagnostice senzoru.

Připojení seismické hmoty k pouzdru je zpravidla realizováno pružinou vyleptanou v křemíkovém substrátu. Klíčové parametry snímače, tj. především citlivost a frekvenční i dynamický rozsah, jsou pak určeny parametry této pružiny. Tuhost pružiny je citlivá na změny teploty, ale významně méně, než je tomu u snímačů pieorezistivních. Navíc mohou být součástí snímače i další zpětnovazební a korekční obvody pro kompenzaci této teplotní závislosti.

1.2.3 Tepelné MEMS

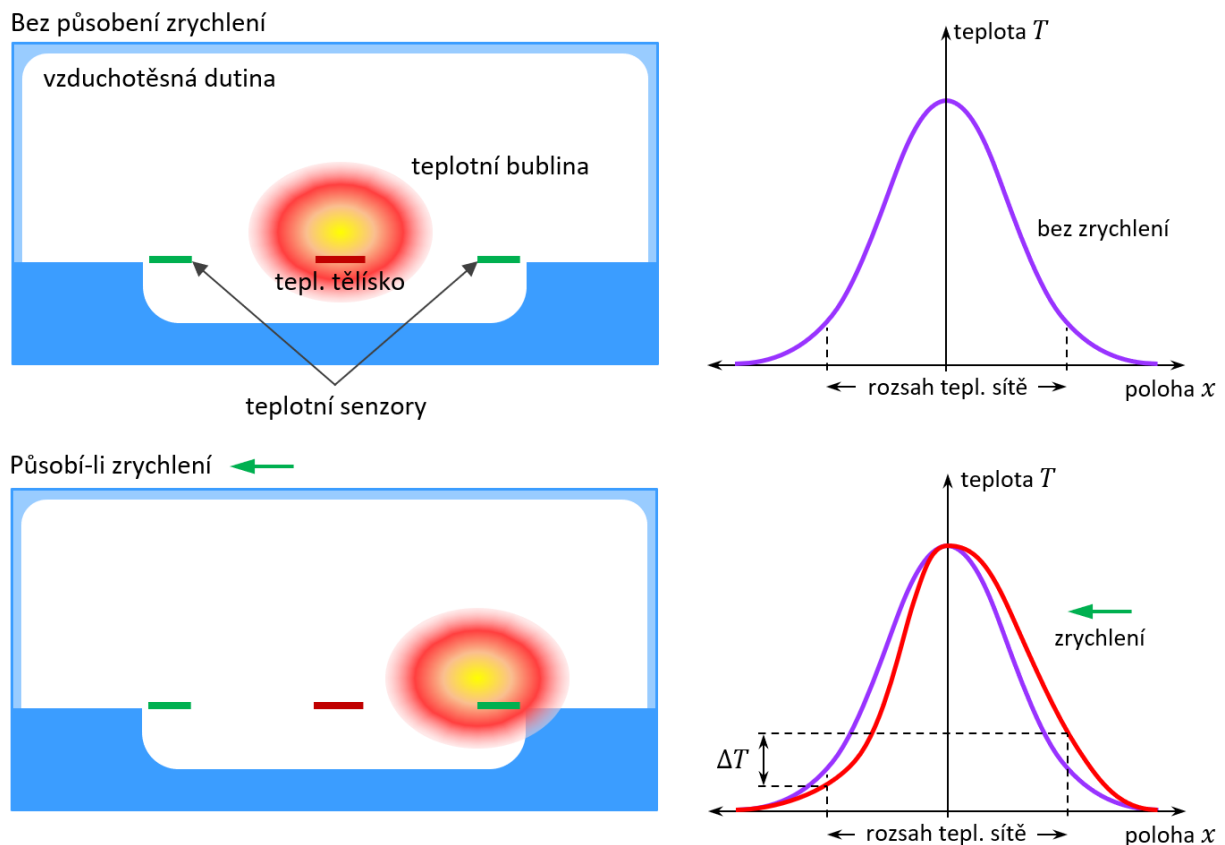
Tepelné MEMS senzory jsou velmi odolné. Využívá se u nich změna přenosu tepla klidného a proudícího vzduchu (plynu) vlivem zrychlení. Snímače neobsahují žádnou pevnou seismickou hmotu spojenou s nosníkem nebo pružinou, ale setrvačná hmota je u nich tvořena ohřátým plynem. Základní struktura senzoru je na obr. 23 a princip činnosti tepelného akcelerometru pak na obr. 24.



Obr. 23 – Struktura tepelného akcelerometru, zdroj autor dle (Mukherjee, 2017)

Snímače pracují na principu přenosu tepla v plynu a snímání rozložení teploty okolo tepelného tělíska. Zdroj tepla je umístěn uprostřed vzduchotěsné tepelné komory naplněné tepelně vodivým plynem a ohřívá tento plyn na konstantní teplotu. Fyzicky je komora realizována v podobě kanálků vyleptaných v křemíkovém substrátu. Po jejich stranách se pak nacházejí sítě termočlánků sloužící k detekci ohřátí plynu v závislosti na vzdálenosti od zdroje tepla. Je-li snímač v klidu, rozložení tepla v okolí zdroje tepla je rovnoměrné. Bude-li na snímač působit

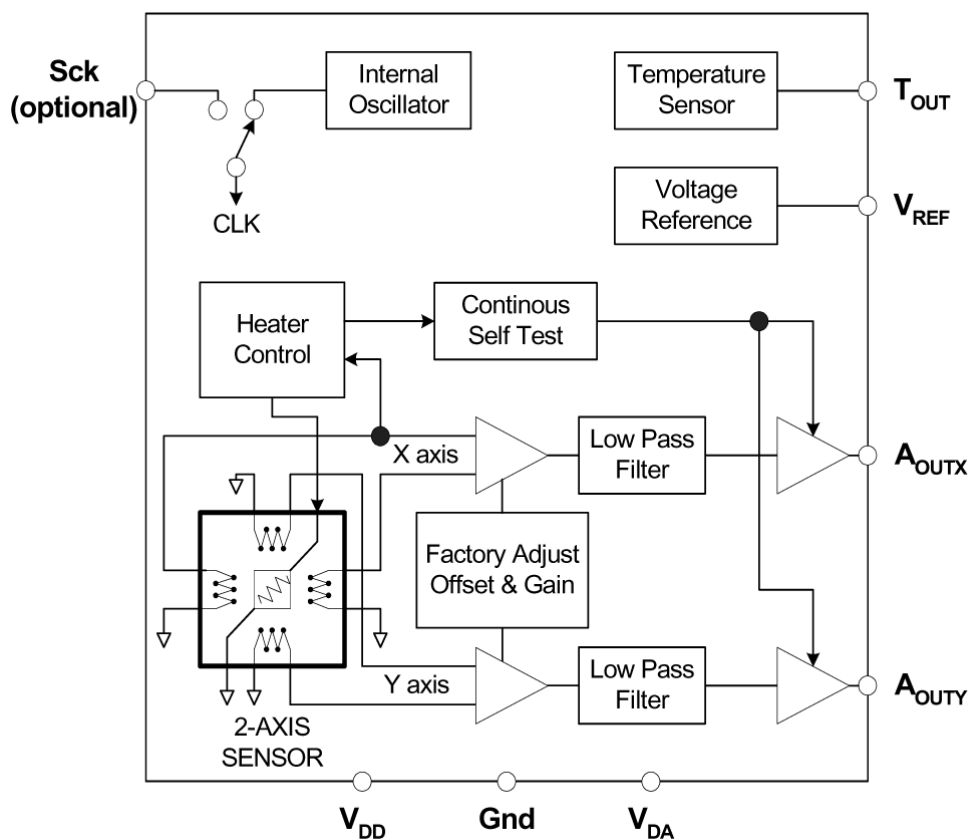
zrychlení, bude ohřátý plyn vlivem působení setrvačné síly pronikat nerovnoměrně proti směru působení zrychlení do dalších oblastí, což detekují přítomné termočlánky. Elektronické obvody integrované na čipu pak vyhodnotí tomu odpovídající změnu velikosti zrychlení. Popisovaný princip je patentován firmou MEMSIC, která tepelné MEMS snímače zrychlení vyvíjí a vyrábí.



Obr. 24 – Princip činnosti tepelného akcelerometru (řez senzorem), zdroj autor dle (Memsic, 2015) a (Mukherjee, 2017)

Jistou nevýhodou takového snímače je jeho značná tepelná závislost, kterou je ale možné (vhodné) kompenzovat pomocí další integrované elektroniky. Tepelné snímače mají poměrně malý frekvenční rozsah, ale lze jimi měřit statické zrychlení. Díky absenci mechanických pohyblivých částí a jednoduchému konstrukčnímu provedení vydrží bez poškození i zrychlení o velikosti až 50 000 G. Principiálně, z důvodu plošné detekce změny teploty v kanálkové komoře, lze ale tyto snímače používat pro měření jen ve dvou osách; měření ve třech osách je velmi špatně realizovatelné.

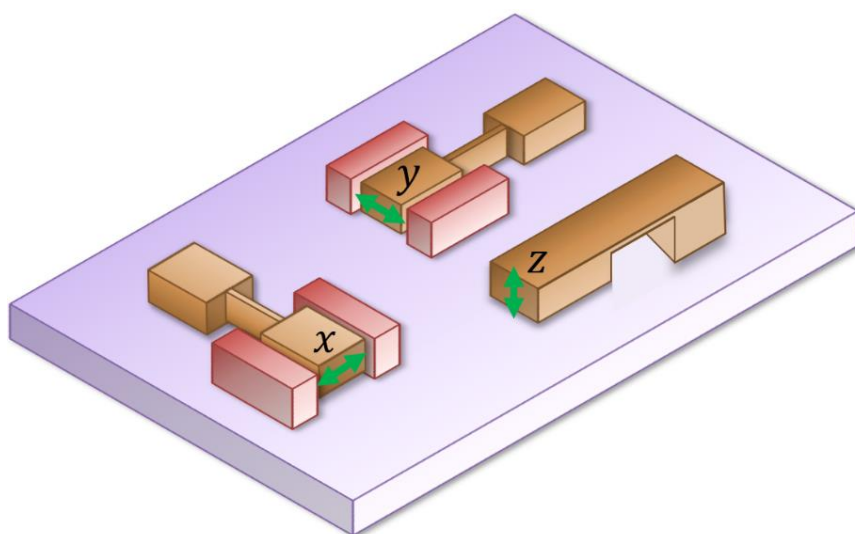
Senzor bývá nejčastěji realizován ve verzi dvouosého nízkošumového akcelerometru s PWM, digitálními (I2C sběrnice) nebo analogovými výstupy. Blokové schéma tepelného MEMS akcelerometru s analogovými výstupy je na obr. 25.



Obr. 25 – Blokové schéma dvouosého tepelného MEMSIC senzoru s analogovými výstupy, zdroj (Vojáček, 2007c)

2 Praktická provedení reálných snímačů

Na trhu dostupné akcelerometry mohou být jedno- či víceosé. Dvou- nebo tříosé se skládají ze 2 až 3 samostatných jednoosých systémů, přičemž každý z nich je natočený do požadovaného směru, takže v ideálním případě snímá zrychlení ve směru příslušné osy.



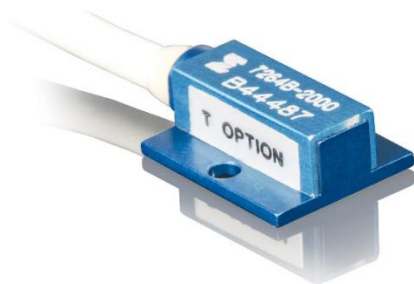
Obr. 26 – K principu dvouosých a tříosých akcelerometrů, zdroj autor

Je-li potřeba snímat zrychlení ve všech třech osách, lze využít akcelerometr tříosý (viz obr. 26), nebo tři akcelerometry jednoosé. Vyjma tepelných MEMS snímačů, které jsou pouze dvouosé, lze u všech zbývajících typů zajistit měření ve všech osách jedním snímačem.

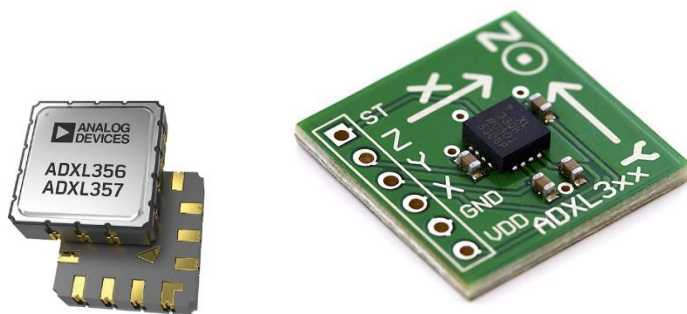
Ukázky možného typického provedení snímačů zrychlení klasické koncepce i typu MEMS jsou na fotografiích na obr. 27 až obr. 30.



Obr. 27 – Různá provedení jedno-, dvou- a tříosých piezoelektrických akcelerometrů, zdroj (Hottinger Brüel & Kjær, 2023) a (Endevco, 2023)



Obr. 28 – Jednoosý piezorezistivní akcelerometr, zdroj (Endevco, 2023)

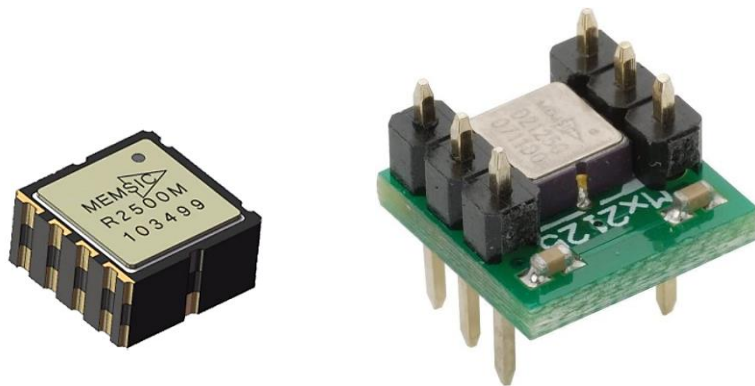


Obr. 29 – Tříosý MEMS snímač: samotný čip a čip osazený na DPS, zdroj (Analog Devices, 2023)

Při výběru snímače je nutné vycházet z kompromisu, je-li potřebná vyšší citlivost snímače nebo široký frekvenční rozsah. Jak již bylo řečeno, splnit oba požadavky současně nelze. Důležité je také posoudit, bude-li potřeba měřit statické hodnoty zrychlení, resp. velmi nízké frekvence, k čemuž nelze využít snímače piezoelektrické.

Od akcelerometru mj. také očekáváme, že bude citlivý především v požadovaném směru nebo směrech. V praxi ale snímač měřící např. v ose Z bude měřit i parazitní zrychlení v osách X a Y. Tato vlastnost je označována jako křížová citlivost (cross sensitivity), je vyjadřována poměrem

citlivostí v požadovaném směru ku parazitním a lze jí ovlivnit především mechanickou konstrukcí nosníku (vhodnou volbou poměru jeho délky a šířky).



Obr. 30 – Dvouosý snímač MEMSIC: samotný čip a čip osazený na DPS, zdroj (Memsic Semiconductor, 2023)

3 Otázky a úkoly

- 1) Na čem je založen základní princip měření zrychlení? Jaký typ akcelerometrů je běžně označován jako senzor zrychlení klasické konstrukce?
- 2) Vysvětlete princip vzniku piezoelektrického napětí a uveďte základní tři možné způsoby deformací.
- 3) Načrtněte typický průběh amplitudové frekvenční charakteristiky akcelerometru. Jaká jsou omezení co do rozsahu snímaných frekvencí zrychlení u neznámějších typů senzorů?
- 4) Vyjmenujte a stručně popište neznámější konfigurace a struktury piezoelektrických akcelerometrů.
- 5) Jaké základní typy MEMS akcelerometrů znáte? Na čem je založena činnost tepelných MEMS (MEMSIC) akcelerometrů?

4 Použitá literatura

ANALOG DEVICES, Inc., 2023. *Accelerometers* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.analog.com/en/product-category/accelerometers.html>>

ENDEVCO, PCB Piezotronics of North Carolina, Inc., 2023. *Accelerometers* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://buy.endevco.com/accelerometer>>

HOTTINGER BRÜEL & KJÆR, 2023. *Measuring Vibrations: Piezoelectric Accelerometers* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/2022/piezoelectric-accelerometers>>

HUSÁK, Miroslav, 2008. Užití MEMS v průmyslu. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku*, **14**(12), 14-18. ISSN 1210-9592.

KISTLER GROUP, 2023. *Piezoelectric effect: what is the piezoelectric effect?* [online]. [citováno 21. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.kistler.com/DE/en/piezoelectric-effect/C00000136>>

LYNCH, Jerome P. a kol., 2003. Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring. In *Journal of Aerospace Engineering*, **16**(3), 108-114. ISSN 0893-1321. DOI 10.1061/(ASCE)0893-1321(2003)16:3(108).

LUFINKA, A. 2012. Snímače pro měření síly, tlaku, kroutícího momentu, zrychlení. In: *Experimentální metody – přednášky*. Liberec, TU.

MEMSIC Inc., 2015. *MEMSIC Advanced Sensing Solutions Overview* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.digikey.in/Site/Global/Layouts/DownloadPdf.ashx?pdfUrl=E8F05580E4D14C13807199A911B3FDA1>>

MEMSIC SEMICONDUCTOR Co., Ltd., 2023. *Thermal Accelerometer* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.memsic.com/thermal-accelerometer>>

MCMILLEN, Chris, Baker Hughes Company, 2023. *Accelerometers: How do they Work?* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://www.bakerhughes.com/bentley-nevada/orbit-home/orbit-article/accelerometers-how-do-they-work>>

MUKHERJEE, Rahul a kol., 2017. A Review of Micromachined Thermal Accelerometers. In *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **27**(12), 18pp. ISSN 0960-1317. DOI 10.1088/1361-6439/aa964d.

VOJÁČEK, Antonín, 2007a. Principy akcelerometrů – 1. díl – piezoelektrické. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>>

VOJÁČEK, Antonín, 2007b. Principy akcelerometrů – 2. díl – piezorezistivní. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>>

VOJÁČEK, Antonín, 2007c. Principy akcelerometrů – 3. díl – tepelné akcelerometry MEMSIC. In *automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [citováno 20. 6. 2023]. Dostupné z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901>>

Seznam zkratk

CLK	clock (hodinový signál)
GND	ground (uzemnění)
I2C	inter-integrated circuit (interní datová sběrnice)

MEMS	micro electro mechanical systems (mikroelektromechanické systémy)
PWM	pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
PZT	piezoelektrická (keramika)
Si	silicium (křemík)
TU	Technická univerzita
USA	United States of America

Rejstřík

akcelerometr, 1, 2, 11
 klasické konstrukce, 1, 2
 MEMS, 12, 15
 kapacitní, 14, 15
 piezorezistivní, 13
 tepelný, 15, 16, 17
 piezoelektrický, 3
 v konfiguraci s ohybem, 11
 v konfiguraci se stlačováním, 9
 izolovaná struktura, 9
 převrácená struktura, 9
 vzpřímená struktura, 10
 v konfiguraci se stříhem, 11
 piezorezistivní, 12, 13, 14
 tenzometrické, 12
 akcelerometry
 piezorezistivní, 12
 elektrostrikce. viz obrácený piezoelektrický jev
 frekvenční charakteristika, 1, 8
 krystal, 3, 4
 nábojová citlivost, 7
 napěťová citlivost, 7
 Newtonův zákon, 1
 obrácený piezoelektrický jev, 4
 piezoelektrické napětí, 4, 6
 piezoelektrický jev, 1, 3, 4, 5, 6, 7
 podélný, 4, 5
 příčný, 4, 5, 6, 11
 střížný, 4, 5, 7, 11
 piezokeramika, 3
 piezorezistivní jev, 12
 piezorezistor, 12, 13
 PZT keramika. viz piezokeramika
 seismická hmota, 1, 2, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15

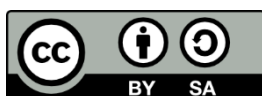
senzor zrychlení. viz akcelerometr

Wheatstoneův můstek, 12

zrychlení, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MS
MIT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY