

3 Automatizační prostředky

V této kapitole se dozvíte:

- Sensory mechanických veličin
- Sensory teploty
- Sensory strojového vidění
- Sensory pro identifikaci
- Logické obvody
- Zesilovače a převodníky
- Kontrolní otázky
- Literatura

Automatizační prostředky je obecný pojem pro veškeré nástroje, konstrukční prvky a vybavení, které se používá při automatizaci v praxi. Společenský i ekonomický důraz kladený na automatizaci přinesl neobyčejný rozvoj celého sortimentu automatizačních prostředků. Současný konstruktér automatických soustav má při jejich přípravě širokou nabídku nejrůznějších konstrukčních prvků, které může při své práci využít. Nebudeme se zde zabývat strojírenskými prostředky, jež tvoří základ například výrobních strojů, ani prostředky pro dopravu materiálu, polotovarů i výrobků. Ty jsou náplní studia strojírenských předmětů i oborů. Zaměříme se na prostředky, které přímo souvisejí s automatickou funkcí jakékoliv soustavy i speciálně stroje. Náš zájem bude soustředěn na prostředky zajišťující získání, přenos a zpracování informací v automatické soustavě. Stranou nezůstanou ani prostředky zajišťující výkon automatické funkce. Z tohoto pohledu můžeme automatizační prostředky uspořádat do čtyř skupin:

- **zdroje informací** (sensory a jejich čidla),
- **přenos informací** (sběrnice, zesilovače, převodníky),
- **prostředky pro zpracování informací** (logické obvody, regulátory, programovatelné automaty),
- **výkonné akční členy a pohony** (pneumatické, hydraulické, elektrické i kombinované).

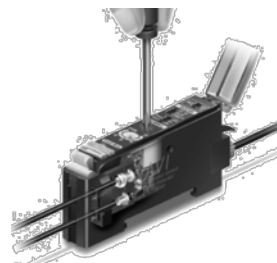
Všechny tyto automatizační prostředky patří do základu studia automatizace. Důležité informace o nich najdete v *kap. 3, 4, 5*. Regulátory pak bylo vhodné umístit bezprostředně po objasnění jejich funkce, tedy do *kap. 6*. Výklad problematiky automatizačních prostředků bude zahájen objasněním účelu a funkce zdrojů informací pro práci automatizovaných soustav, tj. senzorů.

Sensory (*obr. 3.1*) jsou důležitou součástí většiny moderních automatizovaných soustav a zařízení. Jejich prvořadým úkolem je zjišťovat přítomnost různých fyzikálních, většinou neelektrických veličin a umožnit další zpracování získaných údajů. Rychle postupující vývoj mikroelektroniky napomohl rozšíření systémové schopnosti senzorů. Ty se postupně mění na tzv. in-

teligentní a kompaktní měřicí systémy s vestavěnými funkcemi zpracování signálu a specifickými možnostmi komunikace.

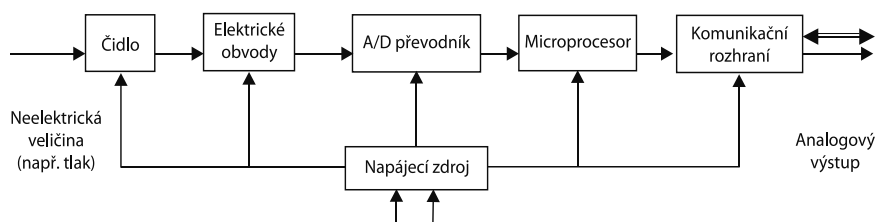
Senzory můžeme dělit podle:

- **měřené veličiny** na senzory teploty, tlaku, průtoku, mechanických veličin (posunutí, polohy, rychlosti, zrychlení, síly, mechanického napětí aj.), senzory elektrických a magnetických veličin aj.
- **fyzikálního principu** na senzory odporové, indukčnosti, indukční, kapacitní, magnetické, piezoelektrické, optoelektronické, optické vláknové aj.
- **styku senzoru** s měřeným prostředím na bezdotykové a dotykové (proximitní a taktilní).
- **tvaru výstupní veličiny** na spojitě (analogové) a diskrétně (nespojitě).



Obr. 3.1 Provedení optického senzoru

Senzor je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Senzor je ekvivalentním pojmem k pojmům snímač, převodník nebo detektor. Citlivá část senzoru se označuje jako **čidlo**.



Obr. 3.2 Schéma inteligentního senzoru

Senzor snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a tu podle určitého principu transformuje na měřenou veličinu, většinou elektrickou. Vzniklý analogový signál je možné transformovat převodníkem A/D na digitální signál a ten pak pomocí mikropočítače dále upravovat (např. provést korekce naměřených hodnot). Ve většině případů digitálního zpracování naměřeného signálu je výstup vybaven rozhraním umožňujícím přenos naměřených dat.

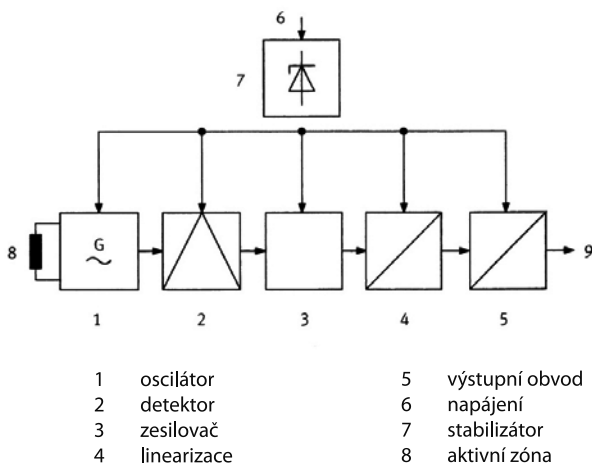
3.1 Senzory mechanických veličin

Na přesném rotačním nebo lineárním pohybu závisí parametry celé řady automatizovaných soustav, a proto se neobejdou bez senzorů polohy, vzdálenosti a úhlu. Při volbě těchto senzorů vycházíme z přesnosti a rozlišení (podíl změny vstupního signálu ke změně signálu výstupního). Posuzujeme také rychlost přenosu dat, rozměry senzoru, jeho složitost, cenu atd.

3.1.1 Indukčnostní senzory

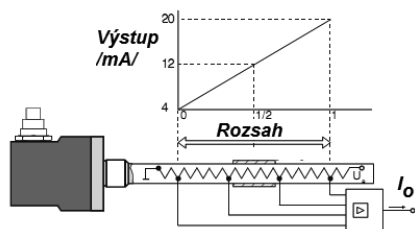
Tyto senzory jsou pasivní. Měřená veličina je převáděna na změnu indukčnosti L nebo vzájemné indukčnosti M . Indukčnost je připojena do měřicího obvodu se střídavým napájením, nejčastěji mřížkového nebo rezonančního.

Bezdotykové senzory polohy jsou pasivní, binární nebo analogové senzory, reagující pouze na kov. Princip měření využívající vířivé proudy patří mezi bezkontaktní metody měření polohy a posunu. Základem senzoru je trvale pracující oscilátor, nejčastěji LC, jehož kmitočet je běžně 0,1 až 1 MHz (obr. 3.3). Cívkou senzoru prochází střídavý proud a kolem cívky, čidla, se vytváří magnetické pole. Pokud se v tomto poli nachází elektricky vodivý kovový materiál, tak se do něho podle Faradayova zákona naindukují vířivé proudy. Podle Lenzova pravidla je pole generované vířivými proudy protiběžné v porovnání s polem generovaným cívkou. Tím se zmenšuje amplituda oscilací. Pokud dále přibližujeme vodivý předmět, sníží se amplituda natolik, že její snížení vyhodnotí klopný obvod a změni svůj stav. Tím také změni svůj stav výstupní obvod, který podle zapojení sepne nebo rozezne spínač.



Obrázek 3.3 Funkční schéma indukčního senzoru

Dotykové indukční senzory měřící vzdálenosti mají široké pole uplatnění. Jejich předností je robustnost, vysoká spolehlivost i za ztížených podmínek, výborná kvalita signálu a teplotní stabilita. Senzory jsou dodávány s integrovanou nebo externí elektronikou a pro připojení měřeného objektu jsou vybaveny posuvným jádrem, objímkou nebo trubicí. Nejčastěji se mimo již popsaný princip používají dva principy, a to FLDT (*Fast Linear Displacement Transducer*) lineární senzor polohy využívající vířivé proudy a LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) proměnný rozdílový transformátor.



Obrázek 3.4 Princip konstrukce senzoru FLDT

Senzor FLDT pracuje na principu vířivých proudů. Funkce senzoru vychází ze změny vlastní indukčnosti cívky v závislosti na poloze hliníkové trubky spojené s odměřovaným objektem (obr. 3.4). Skládá se z válcové cívky s feritovým pláštěm. Do cívky zajíždí jádro, hliníková trubka nebo se po povrchu posunuje kroužek. Cívka je buzena střídavým proudem o kmitočtu kolem 100 kHz. Vytvořené vysokofrekvenční magnetické pole vyvolává ve vnitřní vrstvě vířivé proudy. Výsledná indukčnost závisí pouze na té části cívky, kde není zasunuta hliníková trubka a kde vystupuje magnetické pole.

Tyto senzory se s výhodou využívají pro měření změn polohy v rozsahu kolem 500 mm. Lineární rozdílový transformátor LVDT je tvořen transformátorem s primárním vinutím, dvěma

symetrickými sekundárními vinutími, zapojenými v protifázi. Změnou polohy feromagnetického jádra se mění vzájemná indukčnost primárních a sekundárních cívek.

3.1.2 Magnetostrikční senzory

Pro odměřování vzdálenosti a nastavování polohy jsou určeny senzory pracující na magnetostrikčním principu. Měření je bezdotykové a absolutní.

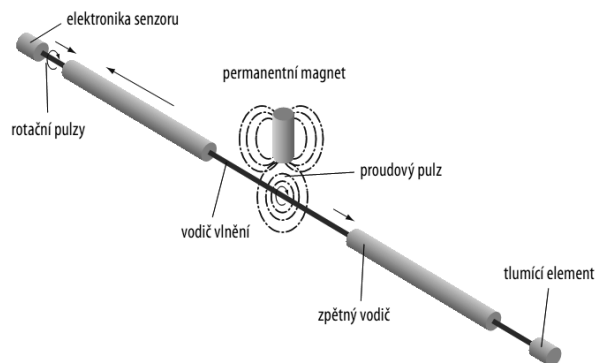
U těchto senzorů (obr. 3.5) je vlnovod vyroben ze speciální slitiny niklu a oceli s vnějším průměrem 0,7 mm a vnitřním 0,5 mm. Měděný vodič je vedený vnitřkem po celé délce této trubičky.

Start měření je inicializován krátkým proudovým impulzem. Tento proud vytváří kruhové magnetické pole, které se otáčí okolo vlnovodu.

Permanentní magnet v bodě měření je použit jako ukazatel polohy, jehož magnetické siločáry jsou kolmé k elektromagnetickému poli. V místě vlnovodu, kde se obě pole protnou, se vytvoří vlivem magnetostrikčního jevu velmi malá elastická deformace, která se šíří vlnovodem oběma směry ve formě mechanické vlny.

Rychlost šíření této vlny na vlnovodu je 2 830 m/s a je prakticky nezávislá na vlivech okolního prostředí. Část vlny, která dosáhne ke vzdálenému konci vlnovodu, je zatlumena, kdežto část, jež přijde do signálového převodníku, je změněna na elektrický signál obrácením magnetostrikčního efektu. Doba přeběhu vlny od místa vzniku k signálovému konvertoru je přímo úměrná vzdálenosti permanentního magnetu elektroniky senzoru. Naměřený čas pak dovoluje určit vzdálenost s extrémně vysokou přesností.

Senzory jsou k dispozici s měřicími rozsahy nastavitelnými požadovaným krokem. Provedení výstupů umožňuje připojit senzory k tradičním vyhodnocovacím i řídicím jednotkám.



Obrázek 3.5 Princip funkce magnetostrikčního senzoru polohy

3.1.3 Kapacitní senzory

Základem kapacitního senzoru je dvou- nebo víceelektrodový deskový kondenzátor, jehož kapacita se mění prostřednictvím měřené neelektrické veličiny. Pro kapacitu deskového kondenzátoru platí uvedený vztah:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (3.1)$$

Kapacita kondenzátorů (čidel) bývá řádově jednotky až stovky pF. Je proto velmi důležité eliminovat vznikající parazitní kapacity. Čidlo je spojeno měřenou neelektrickou veličinou a vlivem její změny (např. natočení rotoru) se může změnit mezera mezi deskami, plocha desek a dielektrikum, a tím výsledná kapacita. Jako měřicí obvod se používají:

- střídavé můstky
- zpětnovazební obvody

- diferenční můstky
- rezonanční obvody.

Senzory na kapacitním principu se používají na měření síly materiálu, polohy, přítomnosti předmětu, deformace, hladiny vlhkosti atd.

Kapacitní senzory bezdotykové reagují na změnu kapacity, která vznikne přiblížením snímaného objektu do elektrického pole kondenzátoru. Základem senzoru je vysokofrekvenční RC oscilátor (obr. 3.6). Elektrody senzoru vytvářejí elektrostatické pole.

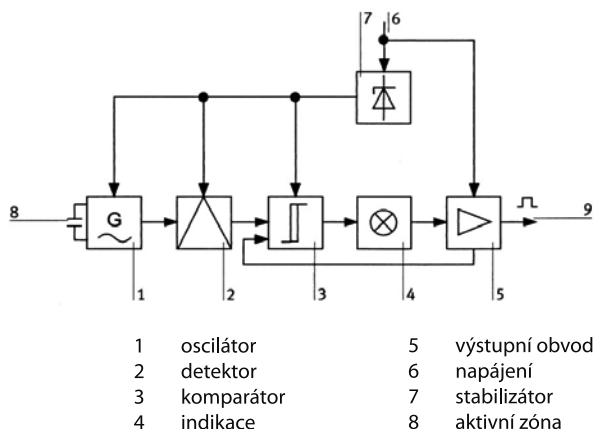
Aktivní plocha kapacitního senzoru je složena ze dvou soustředně umístěných kovových elektrod, podobných elektrodám otevřeného kondenzátoru.

Není-li přítomen žádný objekt, kapacitní reaktance senzoru je nízká, proto je amplituda kmitání malá. Přiblíží-li se objekt k tělu senzoru, vstupuje do elektrického pole vytvořeného elektrodami. To způsobuje vzrůst vazební kapacity mezi elektrodami a obvod začíná oscilovat.

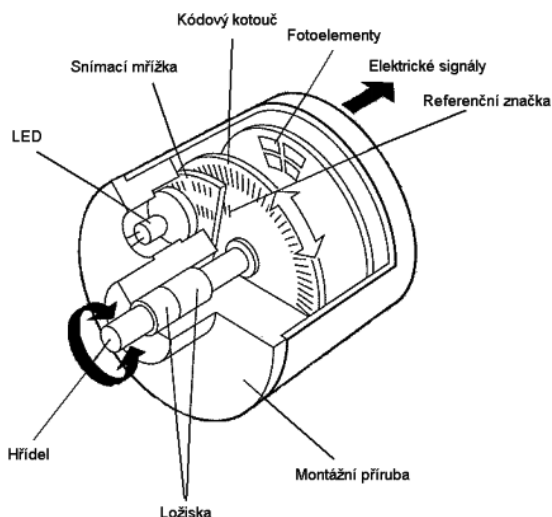
Amplituda kmitání je sledována komparátorem, který zajišťuje spínací výstupní signál. Pokud chceme výstupní signál analogový, není v obvodu zapojen komparátor. Kapacitní senzory reagují na kovové i nekovové materiály. Vzhledem k rozdílné dielektrické konstantě snímaného materiálu je v senzoru zavedena nastavitelná zpětná vazba. Tato proměnná vazba umožňuje selektivní výběr materiálů.

3.1.4 Optoelektronické senzory

Pro detekci objektů v průmyslové automatizaci se vedle ostatních typů senzorů ve velké míře uplatňují optoelektronické senzory. Je to způsobeno jejich stále rostoucími výkony, ale zmenšujícími se rozměry. Mají výhodu v širokém rozsahu vzdáleností, ve kterých jsou schopny detekovat objekty. Jsou však citlivější na vlhkost, vnější světlo a infračervené záření.

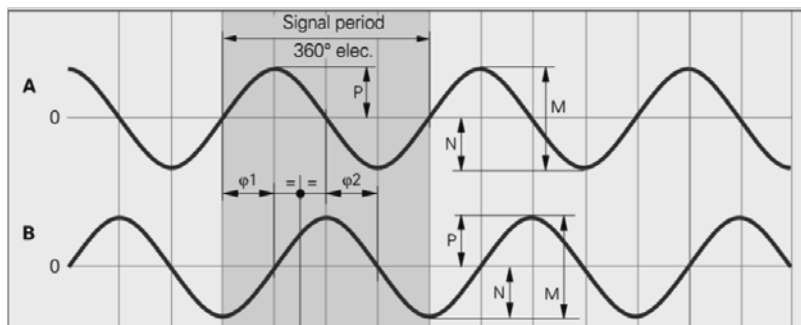


Obrázek 3.6 Funkční schéma kapacitního bezdotykového senzoru



Obrázek 3.7 Inkrementální senzor rastrovacím kotoučkem

Optoelektronické inkrementální senzory pracují na principu clonění nebo reflexe světelného toku mezi zdrojem světla a fotodetektozem pomocí *pravítka* nebo *kotoučku* pravidelně rozdělených na úseky ryskami průhlednými pro světlo nebo reflexními. Senzor používá čtyři mřížky pro vytvoření dvou fázově elektricky posunutých signálů a navíc jednu mřížku pro vytvoření referenční značky. Čtyři pevné snímáčí mřížky jsou vůči sobě přesazeny o čtvrtinu dělicí periody (obr. 3.7). Při otáčení kotouče s rastrem proti pevné mřížce se na fotodetektorech budou vytvářet periodicky se měnící signály A a B, které jsou přivedeny na komparátory. Na jejich výstupech bude pravouhlý signál vzájemně posunutý o 90° . Posunutí umožňuje rozeznat směr otáčení hřídele. Výstupní sin/cos signál (obr. 3.8) je na některých typech senzorů k dispozici pod označením $1V_{PP}$ (*peak*, mezivrcholové napětí, amplituda).

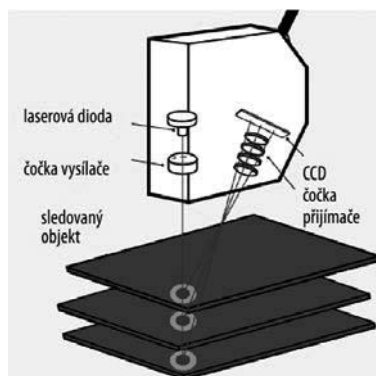


Obr. 3.8 Sinusové inkrementální signály. Fáze A a B jsou vůči sobě posunuty o 90° . Amplituda je typicky 1 VPP.

Optoelektronické absolutní senzory poskytují pro každou úhlovou polohu určitou číselnou hodnotu. Tato kódová hodnota je k dispozici okamžitě po zapnutí. Na hřídeli je namontován kódový kotouč, který je rozdělen na jednotlivé segmenty. Pro senzory s rozlišením do 10 bitů (1 024 poloh na otáčku) lze použít jednoduchou clonku pro každý bit – stopu kotouče. Pro senzory s vyšším rozlišením je třeba hledat jiné cesty, jak signál vyhodnotit. V absolutním senzoru s rozlišením 12 bitů je např. možné použít kotouč se speciálním kódováním a integrovaný obvod pro dekódování polohy.

Triangulační senzory polohy jsou bezdotykové senzory vzdálenosti využívající princip optické triangulace (obr. 3.9). Laserový paprsek vytváří na měřeném objektu nepatrný světelný bod. Detekci úhlu odrazu této skvrny je pak vypočtena vzdálenost. Senzory automaticky kontrolují intenzitu světla. Odražený signál dopadá na snímáčí prvek s vysokým rozlišením a pro další použití je digitálně zpracován. Díky tomu není měření téměř ovlivněno změnami povrchu materiálu, jeho barvou a strukturou. Tloušťka může být měřena dvěma senzory umístěnými proti sobě.

Laserové difuzní senzory jsou také určeny pro bezdotykové měření vzdálenosti. Pracují na principu vysílání krátkých světelných impulzů a zaznamenávají čas, který potřebuje paprsek k náv-



Obrázek 3.9 Princip triangulačního senzoru

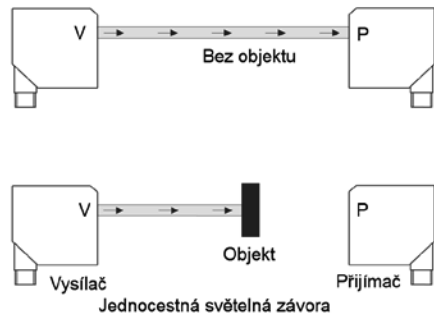
ratu zpět k senzoru. Za milisekundu změří senzor průměrnou dobu mezi vysláním a příjmem tisíce impulzů, z ní spočítá vzdálenost a příslušnou hodnotu postoupí na výstup. Velký dosah senzoru umožňuje měřit vzdálenost malých částí nebo málo nápadných objektů či těles. Senzor pracuje v difuzním módu s odrazem od povrchu identifikovaného předmětu.

3.1.5 Optoelektronické senzory binární

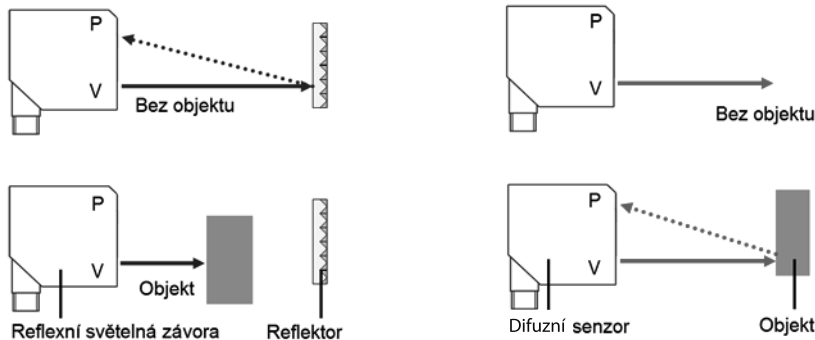
Výhody optoelektronických senzorů oproti senzorům pracujícím na dalších fyzikálních principech spočívá v necitlivosti vůči rušení elektromagnetickými poli a vůči hluku. Jako vysílané světlo se nejčastěji používá světlo infračervené o vlnové délce $\lambda = 880 \text{ nm}$, případně 950 nm , a světlo ve viditelném spektru o vlnové délce 660 nm .

Jednocestné světelné závory mají vysílače montovány proti přijímačům v optické ose (obr. 3.10). Jestliže je nějakým předmětem přerušena přímá cesta světla mezi vysílačem a přijímačem, změní se elektrické vlastnosti fotodetektoru. Tato změna je elektronickou jednotkou vyhodnocena a je signalizována změnou stavu výstupního stupně.

Reflexní světelné závory pracují na podobném principu jako závory jednocestné. Vysílač i přijímač jsou však umístěny v jednom pouzdře vedle sebe (obr. 3.11). Aby světlo vysílače mohlo dopadnout na přijímač, je odraženo zrcadlem umístěným v určité vzdálenosti. Také u tohoto principu je vyhodnocováno přerušení světelného paprsku dopadajícího na přijímač. Aby na přijímač dopadalo co nejvíce světla, je použita odrazka, složená z průhledných trojhranů, pomocí nichž je dopadající světelný paprsek odražen vždy do směru, ze kterého byl vyslán, na rozdíl od rovinného zrcadla. Pro detekci zrcadlicích se předmětů je vhodnější použít reflexní světelnou závoru s polarizačním filtrem. Slouží k bezpečnému rozpoznávání zrcadlicích se a neprůhledných předmětů.



Obrázek 3.10 Princip funkce jednocestné světelné závory senzoru



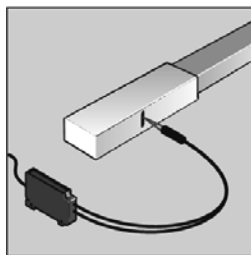
Obr. 3.11 Princip reflexní světelné závory

Obr. 3.12 Princip difuzního senzoru

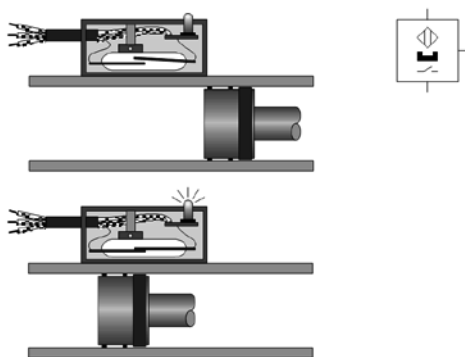
Difuzní senzor (obr. 3.12) má obdobnou konstrukci jako světelná závor. Také zde se nachází vysílač a přijímač v jednom kompaktním pouzdře, ovšem s odlišně orientovanou optikou. Stej-

ně jako u světelné reflexní závory je k vyhodnocení použito odražené světlo, nikoli však od odrazky nebo reflexní fólie, ale přímo od detekovaného předmětu.

Optoelektronické vláknové senzory se mohou používat i v prostředí s vyšší teplotou či stříkající vodou nebo na špatně přístupných místech. Pro tyto aplikace byly vyvinuty zvláštní optoelektronické senzory s optickými vlákny (světlovody) tvořenými transparentními dielektrickými vlákny, která jsou buď plastová (pro nižší teploty), nebo skleněná (pro vyšší teploty). Světlovody umožňují zavést světelné paprsky do různých míst a tam detekovat i ty nejmenší objekty. Jádrem optického vlákna je opatřeno pláštěm, např. z polyetylénu. Pro zvětšení mechanické a tepelné odolnosti se také opatřují sekundárním pláštěm např. z kovů. Na obr. 3.13 je provedení difuzního senzoru s optickými vlákny. Tento pár optických vláken je z druhé strany připojen do zesilovače s vyhodnocovací jednotkou. Na svém výstupu jsou optická vlákna opatřena hlavicí s čočkou.



Obr. 3.13 Princip difuzního senzoru se světlovody



Obr. 3.14 Senzor koncové polohy pneumotoru

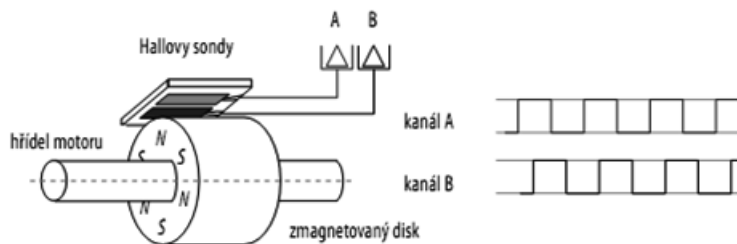
3.1.6 Magnetické senzory

Pro konstrukci těchto senzorů využívajících princip změny indukce magnetického pole B se jako čidlo používají magnetorezistory a Hallovy sondy. V případě senzorů se skokovou změnou odporu se ještě používají jazyčková relé.

Magnetorezistory v případě, že na ně působí magnetické pole, zvětšují svůj odpor. Změna hodnoty závisí na použité technologii výroby součástky. Jsou vyráběny buďto jako feromagnetické AMR (*Anisotropic Magneto Resistance*), nebo polovodičové. Naproti tomu Hallova sonda pracuje na principu vzniku Hallova napětí. Velikost napětí U_H [V] závisí na velikosti řídicího proudu I_c [A], na tloušťce d [m], Hallově činiteli R_H [m^3/As] a velikosti magnetické indukce B [T]:

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B_y}{d} \quad (3.2)$$

Senzory se používají pro detekci koncových poloh pohonů, nejčastěji u translačních pneumatických a hydraulických. V takovém případě mají senzory na svém výstupu pouze binární informaci. V pístním kroužku pneumotoru jsou namontovány permanentní magnety, které jsou snímány přes jeho nemagnetickou stěnu. Jak se píst přiblíží, stav výstupního signálu senzoru se změní (obr. 3.14).

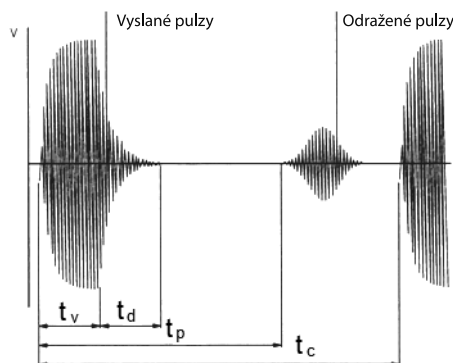


Obr. 3.15 Inkrementální senzor pro určení polohy rotoru

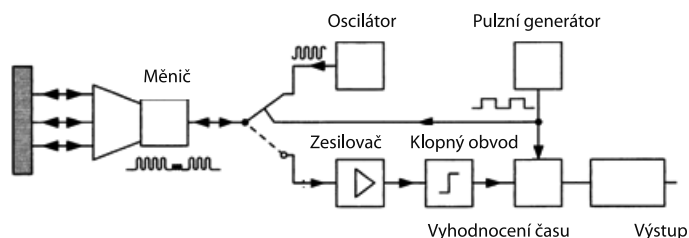
Pokud je na hřídel umístěn zmagnetovaný disk (obr. 3.15), je při jeho rotaci na výstupu Haloových sond generováno napětí závislé na intenzitě magnetického pole B . Tento signál je tvarován pomocí komparátoru a získáme tak obdélníkový průběh. Vzhledem k tomu, že signál kanálu A je oproti kanálu B posunut o 90° , můžeme po úpravě určit směr přírůstku signálu.

3.1.7 Ultrazvukové senzory

Senzory pro měření vzdálenosti využívají ke své činnosti ultrazvukové měniče. Senzor vyšle krátkou sekvenci zvukových pulzů (obr. 3.16), 10 až 20 period t_v s kmitočtem daným rezonancí ultrazvukového měniče. Poté se přepne do přijímacího režimu a očekává odraz od nějakého objektu. Jestliže měnič zachytí odražený signál, porovná jej s vyslanou sekvencí a tím zjistí, zda jde o odraz vyslaného signálu. Pokud ano, je na základě délky časového intervalu t_p mezi vyslanou sekvencí a přijatým odrazem a rychlostí šíření zvuku v daném prostředí vypočítána vzdálenost od sledovaného objektu.



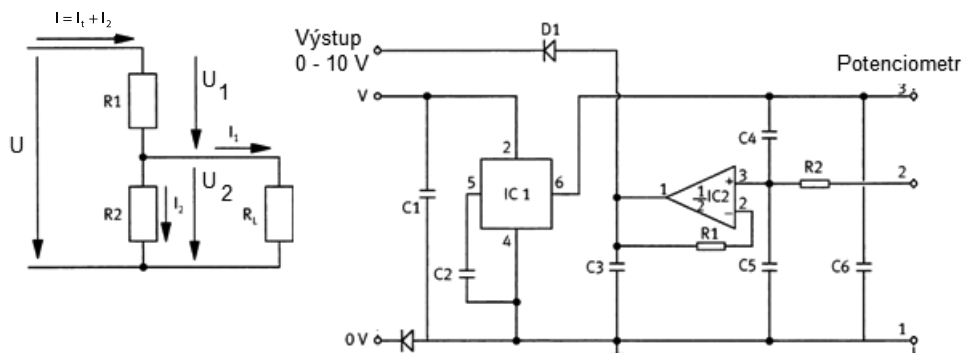
Obrázek 3.16 Průběh signálů ultrazvukového senzoru



Obr. 3.17 Funkční schéma ultrazvukového senzoru s jedním měničem

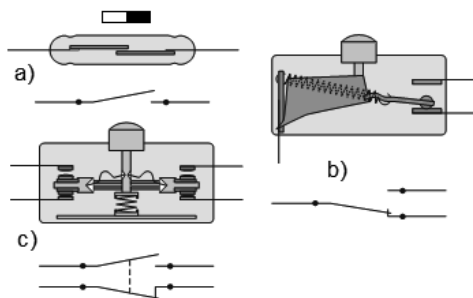
3.1.8 Odporové senzory

Odporové senzory patří mezi dotykové absolutní senzory. Jako čidlo je používán potenciometr – regulovatelný odporový napěťový dělič. Měřená neelektrická veličina je spojitě převedena na změnu odporu a ta je vyhodnocována pomocí můstkové nebo výchylkové metody. Čidlo je s vyhodnocovací částí senzoru spojeno pomocí spojovacího vedení a jeho běžec je mechanicky spojen se sledovaným objektem. Odporová dráha je z vodivého plastu.



Obr. 3.18 Funkční schéma děliče napětí a elektronické části senzoru s impedančním převodníkem IC 2 a zdrojem referenčního napětí IC 1

Potenciometry (proměnné rezistory) můžeme rozdělit podle tvaru pohybu běžce na rotační nebo posuvné. Vlastnosti jsou ovlivňovány hodnotou TKR (teplotní koeficient odporu), životností, rozlišovací schopností, třídou přesnosti a linearitou.



Obr. 3.19 Koncové spínače: a) magneticky ovládané jazyčkové relé, b) mechanicky ovládaný mžikový přepínač, c) mechanicky ovládaný mžikový spínač s odděleným kontaktem spínacím a rozspínacím



Obr. 3.20 Koncový spínač vlcového provedení firmy Euchner

Pokud použijeme pro vyhodnocení výchylkovou metodu, musíme zajistit co největší vstupní odpor vyhodnocovací části senzoru R_L . K tomu slouží zapojení operačního zesilovače IC 2 na obr. 3.18. Jedná se o sledovač, který je charakterizován velkým vstupním odporem, malým výstupním odporem, zesílením 1 a tím, že neobrací fázi.

Mezi odporové senzory patří i senzory se skokovou změnou hodnoty odporu. Tyto senzory se většinou používají jako koncové spínače polohy a ovládají se mechanicky nebo magnetickým polem.

3.1.9 Senzory mechanického napětí, síly a tlaku

K měření mechanického napětí vznikajícího deformací např. nosných konstrukcí při statickém nebo dynamickém namáhání se používají tenzometry. Ke konstrukci tenzometrů se nejčastěji používají principy kapacitní, rezonanční a odporové (piezorezistivní). Při dilataci se některé konstrukční části prodlužují, jiné zkracují. Pokud na tuto konstrukci nalepíme ve směru největší deformace měřicí odporový pásek, tenzometr, bude se jeho prodlužováním nebo zkracováním měnit délka vodiče l [m], a zároveň elektrický odpor R [Ω] podle uvedeného vztahu pro výpočet odporu kovového vodiče. Odpor R závisí na délce vodiče l , průřezu vodiče S [m²] a rezistivitě vodivého materiálu ρ [Ω m]:

$$R = \frac{l}{S} \cdot \rho \quad (3.3)$$

Odporové tenzometry jsou kovové nebo polovodičové. Pro konstrukci kovových tenzometrů se používají odporové slitiny, např. chromnikl (80 % Cr, 20 % Ni). Odporová vrstva ve formě fólie je upravena do tvaru meandru na tenký dielektrický materiál (polyamid). Tímto uspořádáním měřicího odporu (obr. 3.21) zvětšíme jeho citlivost.

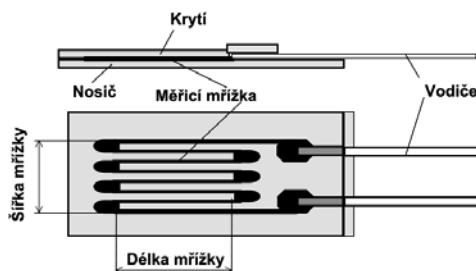
Hodnota odporu ΔR se mění v závislosti na relativním prodloužení ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} [\%], \quad \Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon [\Omega] \quad (3.4)$$

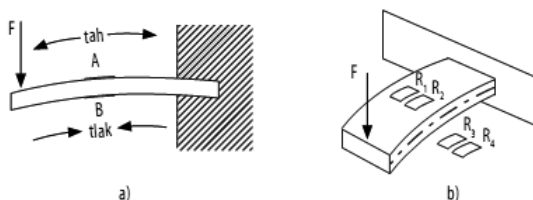
Konstanta k je součinitel deformační citlivosti, který je dán vlastnostmi materiálu, u kovových tenzometrů přibližně $k = 2 - 4$, u polovodičových až $k = 150$.

Pro konstrukci polovodičových tenzometrů se využívá křemíku. Difuzí do destičky se v materiálu vytvoří rezistory tvořící např. Wheatstonův můstek. Deformací dochází v polovodičovém tenzometru typu N ke změně pohyblivosti nositelů náboje; u polovodiče typu P pak ke změně počtu nositelů náboje.

Podle počtu tenzometrů v můstku mluvíme o úplném, polovičním nebo čtvrtinovém můstku. U čtvrtinového můstku je pouze jedno tenzometrické čidlo nalepeno na namáhané těleso. Vzhledem k nutnosti tepelné kompenzace je v blízkosti ještě umístěno odporové teplotní čidlo, které je pak součástí měřicího můstku. Můstek může být napájen stejnosměrným nebo střídavým proudem.



Obrázek 3.21 Fóliový odporový tenzometr



Obrázek 3.22 Nosník s tenzometry pro úplný můstek