

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Inteligentní senzory a jejich chyby

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš MOULE**
Osobní číslo: **E11B0234P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Inteligentní senzory a jejich chyby**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište specifika, konstrukci, vlastnosti a použití inteligentních senzorů.
2. Porovnejte klasické a inteligentní senzory se zaměřením na oblast chyb měření.
3. Seznamte se s nabídkou trhu v oblasti inteligentních senzorů. Uveďte příklady aplikací konkrétních senzorů.
4. Identifikujte zdroje chyb a nejistot měření vyskytující se u inteligentních senzorů. Popište metody používané k eliminaci chyb u senzorů.
5. Zhodnoťte přínosy inteligentních senzorů. Odhadněte oblast budoucího vývoje v této oblasti.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Panc

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se věnuje problematice inteligentních senzorů. Vysvětluje pojem inteligentní senzor a rozebírá jeho konstrukci. Podrobněji se práce věnuje požadavkům kladeným na inteligentní senzory a výskytu chyb. Jsou uvedeny příklady metod eliminace chyb, jako je metoda linearizace, kalibrace, autokalibrace, filtrace a autodiagnostiky. Dále se věnuje výhodám a nevýhodám inteligentních senzorů oproti klasickým senzorům. Uvádí situaci trhu s inteligentními senzory a příklady konkrétního použití v praxi.

Klíčová slova

Inteligentní senzor, eliminace chyb, linearizace, autokalibrace, kalibrace, autodiagnostika, filtrace.

Abstract

The thesis deals with the issue of intelligent sensors. It explains the term of intelligent sensor and also analyses its construction. In detail the thesis dedicates to the claims placed on the intelligent sensors and to the occurrence of errors. The thesis also contains the examples of several methods of elimination of errors, such as linearization, calibration, selfcalibration, filtration and selfdiagnostics. Finally the thesis discusses advantages and disadvantages of intelligence sensors versus classical sensors. It also describes the situation of the market with intelligence sensors and examples of their usage in practice.

Key words

Intelligent sensor, elimination of errors, linearization, selfcalibration, calibration, selfdiagnostics, filtration.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Tomáš Moule

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pancovi za odborné vedení, cenné profesionální rady a připomínky, které mi byly poskytnuty a pomohly při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	SENZORY A INTELIGENTNÍ SENZORY.....	10
2.1	ROZDĚLENÍ SENZORŮ.....	10
2.2	GENERACE SENZORŮ	11
2.3	TECHNICKÉ PARAMETRY SENZORŮ	12
2.3.1	<i>Statické vlastnosti</i>	12
2.3.2	<i>Dynamické vlastnosti</i>	16
2.4	INTELIGENTNÍ SENZOR	17
2.5	STRUKTURA INTELIGENTNÍHO SENZORU	18
3	CHYBY INTELIGENTNÍCH SENZORŮ	19
3.1	NEJISTOTY INTELIGENTNÍCH SENZORŮ	20
3.2	ZDROJE RUŠENÍ A CHYB	21
3.3	ELIMINACE CHYB	22
3.3.1	<i>Linearizace</i>	23
3.3.2	<i>Kalibrace</i>	25
3.3.3	<i>Autodiagnostika</i>	26
3.3.4	<i>Autokalibrace</i>	27
3.3.5	<i>Filtrace</i>	27
3.4	POROVNÁNÍ INTELIGENTNÍCH SENZORŮ S KLASICKÝMI SENZORY.....	28
3.4.1	<i>Výhody inteligentních senzorů oproti klasickým senzorům</i>	28
3.4.2	<i>Nevýhody inteligentních senzorů oproti klasickým senzorům</i>	29
4	PRŮZKUM TRHU	29
4.1	NABÍDKA TRHU.....	29
4.2	POUŽITÍ INTELIGENTNÍCH SENZORŮ.....	29
4.2.1	<i>Měření teploty</i>	30
4.2.2	<i>Měření tlaku</i>	31
4.2.3	<i>Měření síly</i>	32
4.3	BUDOUCNOST INTELIGENTNÍCH SENZORŮ	33
5	ZÁVĚR	34
6	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

1 Úvod

V dnešní době se setkáváme se senzory v mnoha různých zařízeních, které používáme každý den. Senzory jsou obsaženy v mobilních telefonech, televizích, pračkách, ledničkách, automobilech a dalších zařízeních. Senzory jsou také nedílnou součástí měřicích systémů, systémů řízení a automatizace. V publikovaných knižních vydání, v recenzovaných publikacích a na internetových zdrojích není stanoven jednotný termín pro senzor. Lze se setkat s označením čidlo, snímač, senzor, převodník, detektor, inteligentní snímač či s originálním anglickým názvem. V této práci je objasněno stávající názvosloví.

V první části se tato práce zabývá seznámením s klasickými senzory, rozdělením senzorů, generacemi jejich vývoje a technickými vlastnostmi. Je zde popsána konstrukce inteligentního senzoru a jeho vnitřní struktura.

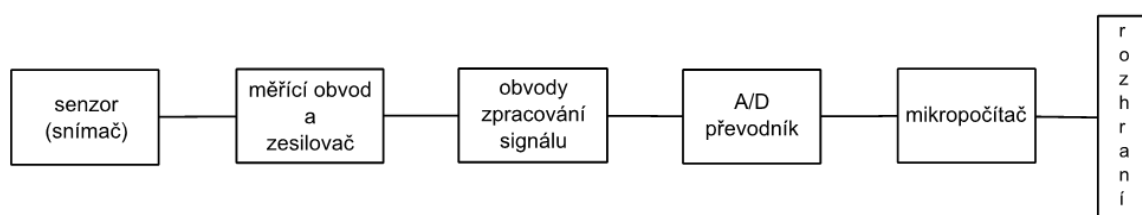
V druhé části se práce zabývá nejistotami a chybami inteligentních senzorů. Jako zdroje chyb lze označit offset, drift, nelinearitu, chybu zesílení, aliasing, hysterezi a příčnou citlivost. Dále je probírána problematika eliminace chyb inteligentního senzoru. Jako metody eliminace chyb jsou uvedeny linearizace, kalibrace, autodiagnostika, autokalibrace a filtrace. V části porovnání inteligentních senzorů s klasickými senzory jsou uváděny výhody, přínosy a nevýhody inteligentních senzorů.

Poslední část práce je zaměřena na nabídku trhu. Je zde uvedeno kde se inteligentní senzory používají a příklady několika výrobců inteligentních senzorů. V této kapitole jsou uvedeny konkrétní typy inteligentních senzorů pro různá měření a jejich srovnání s klasickými senzory. Dále se v této kapitole práce zabývá odhadem vývoje inteligentních senzorů.

Práce je ukončena zhodnocením výsledků, poznatků a zjištění v průběhu zpracování bakalářské práce.

2 Senzory a inteligentní senzory

SENZOR ekvivalentní pojem snímač, převodník nebo detektor je základní funkční prvek, který je ve styku s měřeným prostředím. Jeho činností je snímání fyzikální, chemické nebo biologické veličiny a transformování této veličiny na definovanou veličinu. Citlivá část senzoru se označuje jako čidlo. Nejčastěji jsou veličiny převáděny na elektrický signál, který se dále zpracovává. Senzor je nejdůležitějším blokem měřicího řetězce a jsou na něj kladeny velké nároky. [1]



Obr. 1 Blokové schéma měřicího řetězce se senzorem

2.1 Rozdělení senzorů

Senzory jsou děleny podle různých hledisek a kategorií.

- Dle vstupní (měřené) veličiny
(teplotní, mechanické, chemické, elektrické, magnetické, biologické aj.)
- Dle výstupní veličiny
(elektrický signál, optický signál, mechanická veličina aj.)
- Dle fyzikálního principu
(odporové, indukční, kapacitní, magnetické, piezoelektrické senzory aj.)
- Dle styku senzoru s měřeným prostředím
(bezdotykové, dotykové)
- Dle transformace signálu
(aktivní, pasivní)
- Dle výrobní technologie
(elektromechanické, mechanické, elektronické, elektrické, polovodičové aj.)

Senzory lze rozdělit na aktivní a pasivní. Pojem aktivní senzor znamená, že se chová jako zdroj elektrické energie. Způsobuje to měřená veličina, která je ve styku se senzorem. Mezi aktivní senzory patří termoelektrické, piezoelektrické, indukční, kapacitní, hallový snímače a další.

U pasivních senzorů je potřeba převádět měřenou elektrickou veličinu na analogový signál. Měřenou veličinu může představovat odpor, kapacita, indukčnost a imitance. Měřicí veličinou je poté amplituda, kmitočet, fáze aj. Do pasivních senzorů patří odporové, indukční, kapacitní, vodivostní, optoelektronické senzory a další. Rozdíl mezi aktivními a pasivními senzory je i v napájení. Aktivní senzor není potřeba napájet, kdežto u pasivních senzorů je nutné přivést napájení. [1]

2.2 Generace senzorů

Senzory se během let vyvíjely postupně. Dnes jsou řazeny do tří generací. První generace využívá základní fyzikální principy. Do této generace se řadí odporové, indukční, kapacitní, termoelektrické, piezoelektrické a další senzory. Vývoj této generace byl ukončen až na mimořádné změny ve výrobě. První generace senzorů se využívá v robotice a automaticce.

Druhá generace využívá polovodičů a fyzikálních jevů spojených s polovodiči. Jejich výzkum se rozvíjel s nástupem polovodičové techniky. Díky integraci s elektronikou dochází k částečnému nebo úplnému spojení čidla s informační částí řetězce. Řady a matice senzorů se tak mohou vložit do jednoho pouzdra. V druhé generaci se výrazně zlepšily parametry. Do parametrů lze zahrnout citlivost, miniaturizaci, přesnost, dynamické vlastnosti a další. Vývoj této generace pořád pokračuje s dalším objevováním nových materiálů a technologií výroby. Tato skupina senzorů se výrazně používá v robotice. Do této generace lze zařadit inteligentní senzor a jejich vývoj pokračuje v třetí generaci.

Třetí generace vychází z rychlého rozvíjení optických systémů, které potřebují dokonalejší senzory. V této skupině senzorů se na výstupu objevuje světelný signál (tok). U předchozích generací to byl vždy elektrický signál. Do této skupiny se řadí světlovodné (optické vláknové senzory) a optoelektrické senzory. Světlovodné senzory jsou ovlivňovány měřenou neelektrickou veličinou a přímo ovlivňuje světelný tok. Tím tyto senzory mohou být výrazněji citlivější a menších rozměrů než senzory s převodem na elektrický signál. Senzory, které lze připojit na laserové paprsky a jiné vlnovody, se souhrnně nazývají

Mikro-Elektro-Mechanické Systémy (MEMS). Pro systémy využívané čistě v optoelektronice se používá název Mikro-Elektro-Mechanické Systémy (MOEMS). Senzory této generace jsou pořád ve vývoji, ale některé typy se již sériově vyrábějí. [2]

2.3 Technické parametry senzorů

Technické parametry senzorů charakterizují základní vlastnosti senzoru. Dělí se na statické a dynamické vlastnosti. [3]

2.3.1 Statické vlastnosti

Statické vlastnosti vyjadřují, jak se senzor chová v časově ustáleném stavu. Nejdůležitější charakteristikou statických vlastností senzoru je statická přenosová charakteristika (kalibrační). Vyjadřují se pomocí algebraických rovnic. Do statických vlastností patří citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah, reprodukovatelnost, rozlišitelnost, aditivní a multiplikatívni chyby, linearita a hystereze.

Citlivost je schopnost senzoru reagovat na změnu snímané veličiny a lze ji definovat jako sklon křivky statické charakteristiky. Lze ji vyjádřit pomocí vztahu

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{df(x)}{dx} \quad (1)$$

, kde Δy a Δx jsou přírůstky citlivosti. Lépe lze citlivost definovat vztahem

$$K = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{z_1, z_2, \dots, z_n = \text{konst.}} \quad (2)$$

, kde z_1, z_2, \dots, z_n jsou parazitní veličiny, které působí na senzor.

Práh citlivosti senzoru je dán snímanou fyzikální veličinou, kterou senzor snímá. Je to nejmenší hodnota, kterou senzor dokáže detekovat. Na výstupu senzoru je pak signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru.

Dynamický rozsah senzoru je dán intervalem naměřených hodnot, ohraničen prahem citlivosti (dolní mez) a maximální hodnotou snímané fyzikální veličiny (horní mez).

Reprodukovatelnost senzoru je dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobém časovém sledu neměnné vstupní veličiny a neměnných rušivých vlivů okolí.

Rozlišitelnost senzoru je nejmenší přírůstek snímané veličiny na výstupu senzoru, který sensor zaznamená při změně snímané veličiny na vstupu. Odpovídá absolutní nebo relativní chybě senzoru. Rozlišitelnost je dána dvěma vztahy. Pro analogovou transformaci platí vztah

$$r_a = \frac{1}{\frac{y_{max} - y_{min}}{2(\Delta y)_{max}} + 1} \doteq 2\delta_s \quad (3)$$

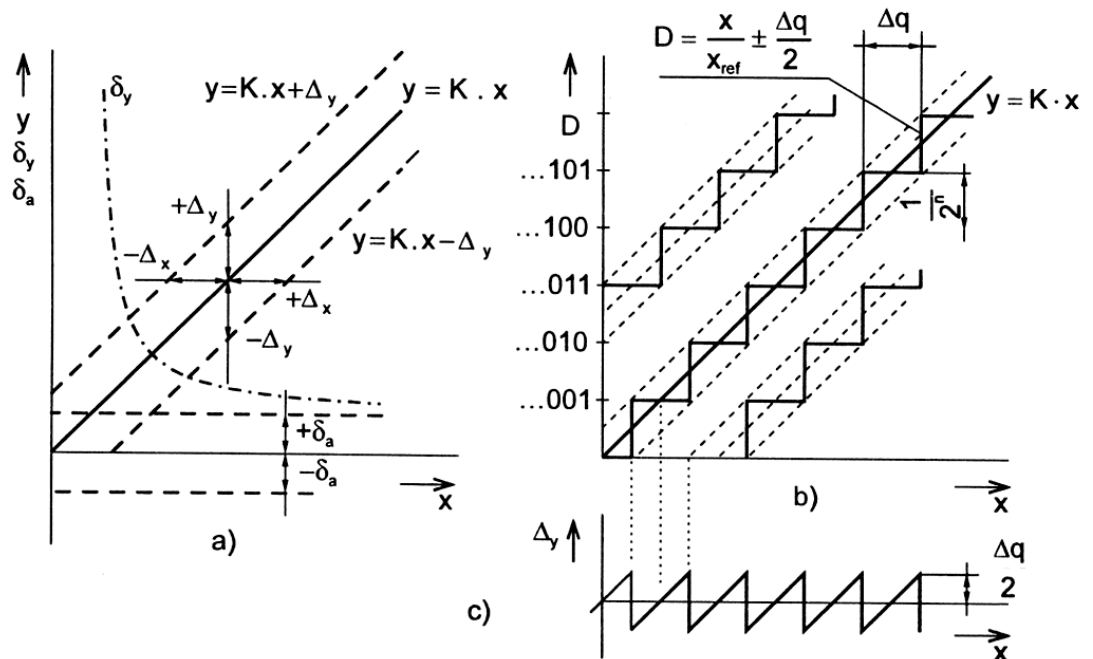
, kde $(\Delta y)_{max}$ je maximální hodnota absolutní chyby měření v rozsahu měření a δ_s je relativní chyba senzoru.

Transformace analogového signálu na číslicový signál je dána vztahem

$$r_d = \frac{1}{2^n - 1} \doteq \frac{1}{2^n} \quad (4)$$

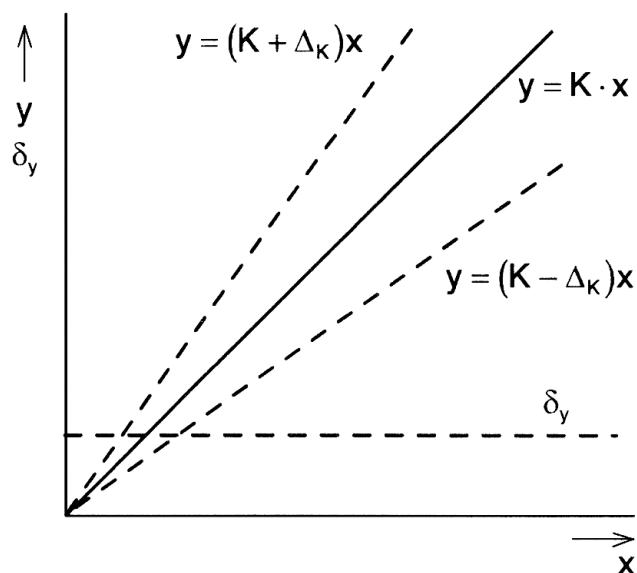
, kde n je počet bitů.

Aditivní chyba (δ_a) senzoru (obr. 2) je způsobena posuvem jmenovité lineární charakteristiky. Dále posuvem nulové nebo počáteční vstupní snímané veličiny. Vliv na vstupní snímanou veličinu má teplotní, časový, napěťový nebo jiný drift offsetu. Do aditivních chyb lze zařadit relativní chybu senzoru, třídu přesnosti, chybu nelinearity, kvantovací chybu a chybu vyjádřenou počtem digitů.



Obr. 2 Aditivní chyby a) při analogovém výstupním signálu, b) při číslicovém výstupním signálu, c) kvantizační šum [4]

Multiplikativní chyba senzoru (obr. 3) je rovnocenná změně citlivosti senzoru. Je to chyba, při které dochází k odchylce sklonu statické charakteristiky od jmenovité. Tato chyba je způsobená změnou odporové sítě zesilovačů, vlivem teploty a jiných parazitních veličin aj.

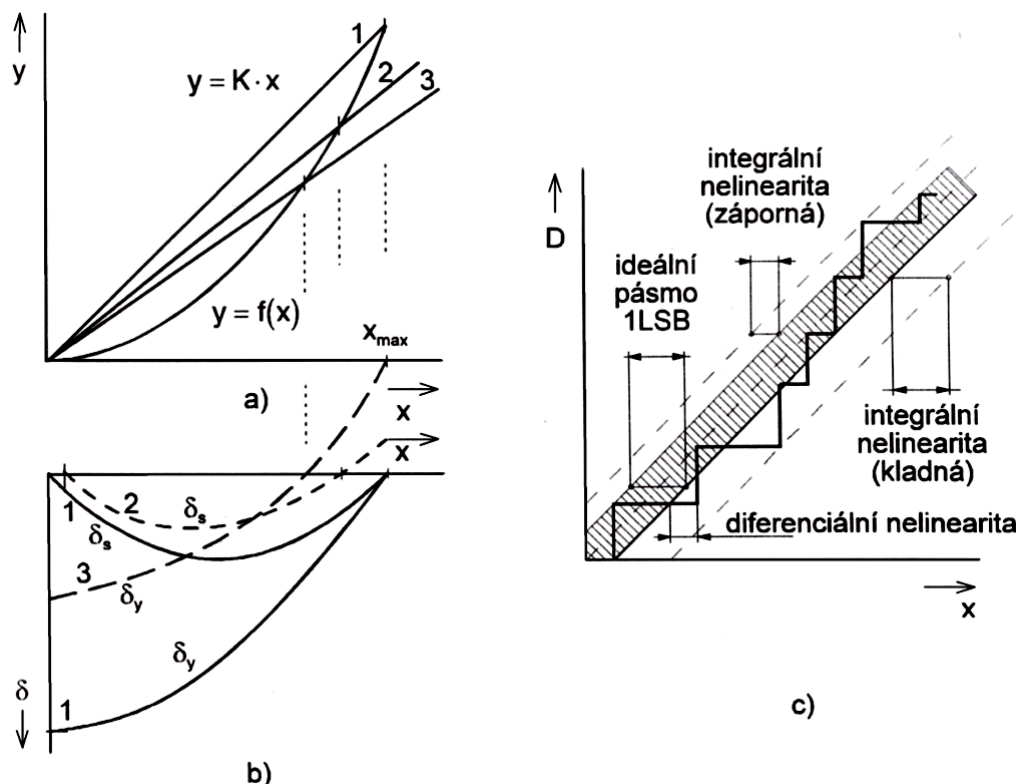


Obr. 3 Multiplikativní chyba [4]

Chyba linearity senzoru (obr. 4) je dána odchylkou realné a ideální křivky statické charakteristiky, která lze vyjádřit vztahem (pro analogový signál)

$$\delta_L = \left(\frac{y_N - y_L}{y_{max} - y_{min}} \right) \quad (5)$$

, kde y_L je definovaná ideální lineární funkcí $y = K * x$.

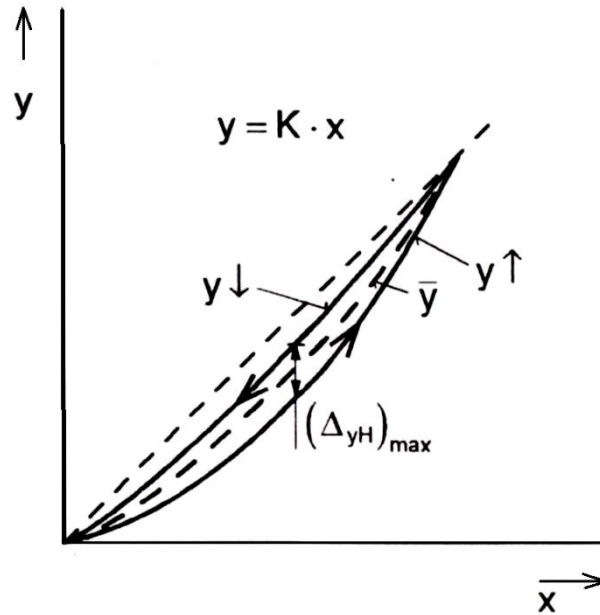


Obr. 4 Chyby linearity a) statické charakteristiky s různými konstantami K, b) odpovídající chyby linearity, c) integrální a diferenciální nelinearita při číslicovém zpracování [4], [5]

Hystereze senzoru je omezujícím parametrem přesnosti mechanických systémů. Je to maximální rozdíl ve výstupu při libovolné hodnotě měřeného rozsahu. Hodnota je nejdříve měřena při zvyšování a poté při snižování měřené veličiny. Chyba hystereze senzoru je dána vztahem

$$\delta_s = \left(\frac{y \downarrow - y \uparrow}{y_{max}} \right)_{max} = \left(\frac{y_{\Delta H}}{y_{max}} \right)_{max} \quad (6)$$

, kde $y \uparrow$ jsou hodnoty rostoucí funkce, $y \downarrow$ jsou hodnoty klesající funkce a y_{max} je maximální hodnota funkce. Popisující funkce je vyjádřena vztahem $y = K * x$ (7)



Obr. 5 Hysterezní nelinearita [4]

2.3.2 Dynamické vlastnosti

Dynamické vlastnosti senzoru charakterizují chování měřené fyzikální nebo jiné veličiny s neustále měnícím se časem. Do dynamických vlastností patří časová konstanta, šíření frekvenčního pásma, parametry časové odezvy, rychlost číslicového přenosu a parametry šumu. Popis dynamických vlastností senzoru lze provést pomocí lineárních diferenciálních rovnic s konstantními parametry nebo přenosovými funkcemi. Je-li rovnice nelineární, je nutné ji po částech linearizovat a sledovat dynamické vlastnosti v daných úsecích. V praxi se dynamické vlastnosti vyjadřují pomocí frekvenční charakteristiky (obr. 6). Tato charakteristika vyjadřuje rozdíl amplitudy a fáze výstupního signálu vůči vstupnímu v závislosti na frekvenci. Časovou konstantu a jiné časové parametry lze určit z přechodové charakteristiky. Přechodová charakteristika je závislost výstupní veličiny na čase při skokové změně vstupní veličiny.

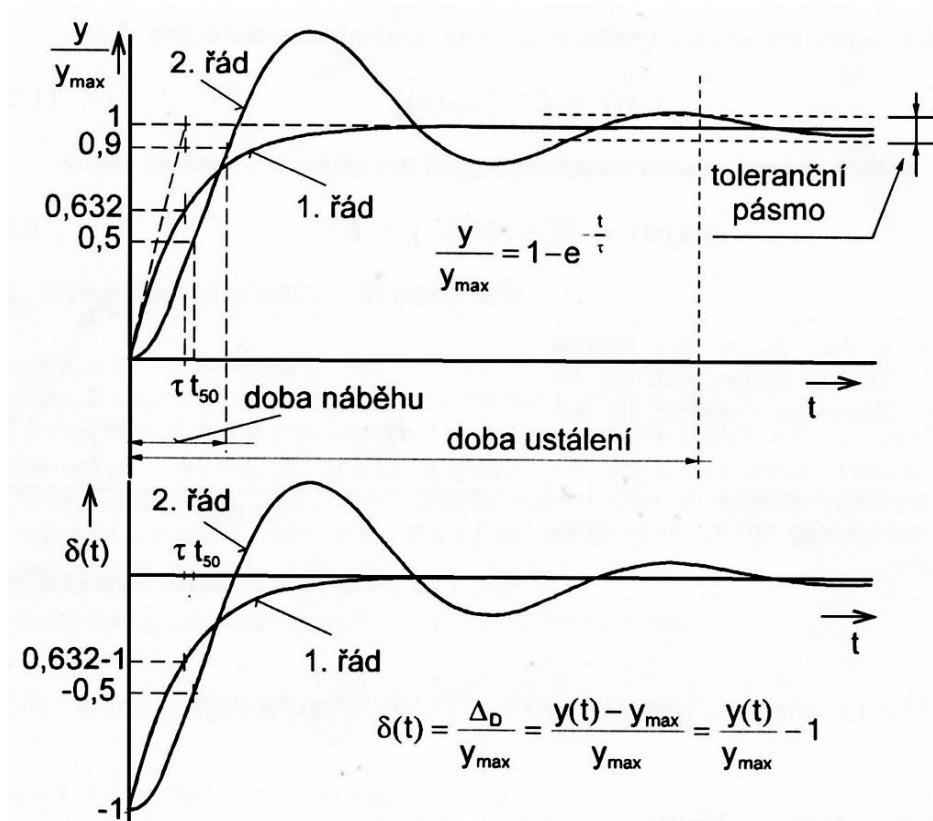
Dynamická chyba měření ($\Delta_D(t)$ resp. $\delta_D(t)$) vzniká odchylkou mezi ideálním a reálným chováním senzoru. Pomocí zpětné Laplaceovy transformace získáme časovou funkci dynamické chyby. Dynamická chyba se používá pro stanovení dynamických vlastností senzoru při skokové změně vstupní měřené veličiny. Skoková změna měřené veličiny není realizovatelná. Proto se uvažuje skoková změna jako přechodový děj, který trvá méně než doba, za kterou hodnota vstupního signálu dosáhne 50% maximální ustálené hodnoty.

Číslicovým zpracováním analogového signálu se dynamická chyba zvětšuje. Je to způsobené vzorkováním analogového signálu v diskrétních časových okamžicích.

Předpokládáme, že vzorkovací perioda T_v je vždy větší než doba převodu analogového signálu na číslicový. Při tomto předpokladu platí podmínka

$$T_v \leq \frac{x_{max}}{\left| \left(\frac{dx}{dt} \right)_{max} \right|} \quad (8)$$

, kde $(dx/dt)_{max}$ je maximální přípustná rychlost vstupní veličiny, aby přídatná dynamická chyby nepřekročila hodnotu kvantovací chyby.



Obr. 6 Přejchodové charakteristiky a dynamické chyby [5]

2.4 Inteligentní senzor

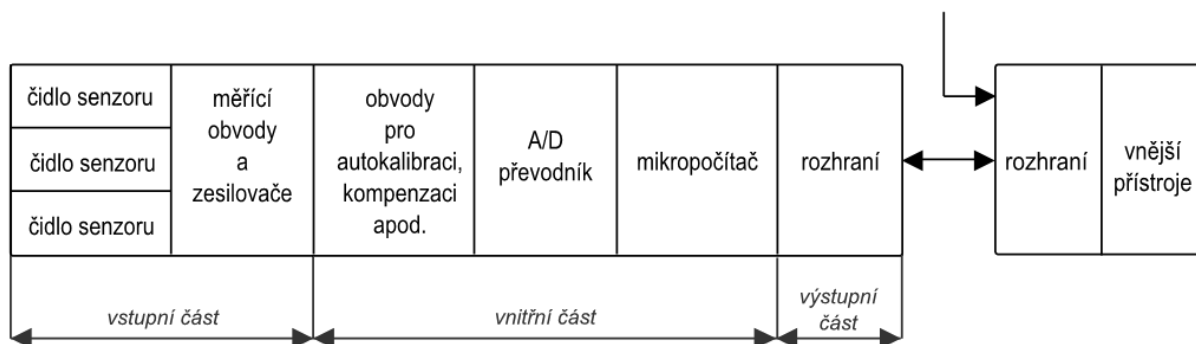
Inteligentní (smart) senzor je senzor obohacený o základní prvky, které pracují s výstupním signálem citlivé části senzoru. Do základních prvků se řadí obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu. Cílem je integrace všech prvků společně s čidlem do jednoho kompaktního provedení. Jako inteligentní senzor lze označit i zařízení, kde je čidlo vzdálené od mikroelektronické integrované části a bude fungovat jako jeden celek. Oddělení čidla od mikroelektronické integrované části může dojít při extrémních podmínkách (teplota, tlak, agresivní prostředí, atd.) působící na čidlo, nebo pokud nelze čidlo vyrobit mikroelektronickou technologií. [4]

2.5 Struktura inteligentního senzoru

Struktura inteligentního senzoru lze rozdělit na tři bloky. Blok, který je v přímém kontaktu s měřenou (fyzikální, chemickou a biologickou) veličinou se označuje, jako vstupní část (obr. 7). Zajišťuje převod veličiny na vhodný elektrický signál. Vstupní část obsahuje převodníky, stabilizátory, zesilovači, membránami aj. Tyto elektronické prvky mají za úkol vhodně upravovat elektrický signál. Do jejich funkce patří zesílení, filtrace, normování signálu, linearizace statické charakteristiky, přepínání více vstupních veličin s adresací v řadě a ve smyčce. Vstupní část také zajišťuje ochranu proti nežádoucímu rušení pronikající z okolí senzoru a nežádoucích vstupních veličin.

Druhý blok se označuje jako vnitřní část. Tato část obsahuje A/D a D/A převodníky, paměti, mikroprocesory, komparátory, generátory. Pomocí těchto prvků se zpracovává vstupní signál a zajišťuje se nulové nastavení počáteční hodnoty a kompenzování vnějších vlivů, jako je teplota aj. Ve vnitřní části probíhá analogově-číslicový převod, autokalibrace elektrické i neelektrické části měřicího řetězce, aritmetické operace, číslicová linearizace, autodiagnostika, kontrola mezí, statické vyhodnocování měřených dat, registrace mezivýsledků. Inteligentní senzory nejvyšší inteligence jsou schopny rozpoznat z mezivýsledků, zda se jedná o věrohodně naměřená data.

Třetí část se označuje jako výstupní část senzoru. Tato část zajišťuje komunikaci senzoru prostřednictvím integrovaného rozhraní se sběrníkovým systémem s následujícími zařízeními. Inteligentní senzory využívají ke komunikaci drátové standardy (RS-232, RS-485, 1-WIRE, SPI aj.), komunikační protokoly (CAN, LIN, HART, FIELDBUS aj.) a výjimečně bezdrátové standardy. Výstupní část v případě potřeby zajišťuje převod výstupního číslicového signálu na unifikovaný analogový signál. Unifikace je ve většině případů normalizovaná na hodnoty 0-10 V, 0-20 mA a 4-20 mA. Výstupní část může obsahovat výkonové binární výstupy, po kterých se mohou vysílat řídicí signály pro výkonová zařízení. Důležitým úkolem je i ochrana před působením nežádoucích vlivů na výstupu. Mezi nežádoucí vlivy patří zkraty, přepětí, odpojení zařízení aj. [6]



Obr. 7 Blokové schéma inteligentního senzoru

3 Chyby inteligentních senzorů

Chyby inteligentních senzorů negativně ovlivňují výsledky měření a tím způsobují nejednoznačnost výsledků. Chyby vznikají působením negativních vlivů vnějšího prostředí, ale i vnitřních vlivů. Chyby lze rozdělit na systematické, náhodné a hrubé.

Systematické chyby (nejistota typu B) svým působením ovlivňují systematicky výsledky měření za stálých podmínek. Velikost této chyby lze stanovit vztahem

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (9)$$

, kde x_m značí naměřenou veličinu a x_s značí skutečnou veličinu. Systematické chyby lze pomocí korekcí, kompenzací apod. z velké části zmenšit a odstranit tak jejich vliv na měření.

Nahodilé chyby (nejistota typu A) však nelze tak jednoduše odstranit jako systematické chyby. Nahodilé chyby se objevují nečekaně a nelze je vyloučit. K určení velikosti těchto chyb se využívá opakované měření. Výsledek se poté určí ze souboru naměřených hodnot vycházející z opakovaného měření za stejných podmínek pomocí aritmetického průměru \bar{x} . Náhodná chyba se v teorii nejčastěji vyjadřuje jako směrodatná odchylka. Směrodatnou odchylku lze vyjádřit pomocí vztahu

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} \quad (9)$$

, kde Δ_{xi} vyjadřuje chybu měření a n označuje počet opakování měření.

Hrubé chyby jsou zcela nevyzpytatelné. Při výskytu této chyby při snímání měřené veličiny zcela znehodnotí měření. Hrubé chyby se vyznačují tím, že naměřené hodnoty výrazně vybočují a velmi se liší od ostatních hodnot. Tyto hodnoty se vylučují a dále už se nezpracovávají.

Hrubé chyby lze vyjádřit jako součet systematické složky a náhodné složky, což vyplývá ze vztahu

$$\Delta_x = e + \varepsilon \quad (10)$$

, kde e je systematická složka a ε je náhodná složka chyby. [7]

3.1 Nejistoty inteligentních senzorů

Nejistoty v inteligentních senzorech vznikají již při měření veličiny. Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku, který lze racionálně přiřadit k naměřené hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se netýká pouze měření, ale týká se i použitých konstant, korekcí, kalibrací apod. Základem k určování nejistot je předpoklad rozdělení pravděpodobnosti, který popisuje odchylku udávané hodnoty od skutečné. Nejistoty lze rozdělit do dvou typů na nejistotu typu A a typu B.

Standardní nejistoty typu A (u_A) se získávají statickým zpracováním hodnot měřené veličiny získané z opakovaného měření za stejných podmínek. Je způsobována náhodnými chybami, které vznikají za neznámých podmínek. Tyto nejistoty se zmenšují s vzrůstajícím počtem měření.

Standardní nejistoty typu B (u_B) jsou způsobeny různými zdroji a výsledná nejistota je dána jejich součtem. Tyto nejistoty jsou způsobovány známými a detekovatelnými příčinami vzniku. Jejich určování není vždy jednoduché a je potřeba provádět podrobný rozbor chyb u složitějších měřících zařízení.

Výsledná nejistota se označuje jako kombinovaná standardní nejistota (u_C). Tato nejistota je dána sumací nejistot typu A a typu B. Udává interval, ve kterém se s velkou pravděpodobností vyskytuje skutečná hodnota měřené veličiny.

Pro větší pravděpodobnost správného výsledku se používá rozšířená standardní nejistota (U), která se získá vynásobením kombinované standardní nejistoty a součinitelem k_U . V praxi se nejvíce používá hodnota součinitele $k_U = 2$. Při zjišťování jednotlivých standardních nejistot se postupuje podle způsobu měření a počtu měřených veličin.

Za zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které svým působením ovlivňují neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření. Svým působením oddalují naměřenou hodnotu od té skutečné. Na nejistoty působí výběr použitých filtrů, vzorkovačů, snímačů a dalších částí v celém procesu přenosu a úpravy signálu. Na nejistoty mají velký vliv měřící metody a nežádoucí vlivy okolního prostředí. Za zdroj nejistot lze označit linearizaci, aproximaci, interpolaci při úpravě signálu. Dále neznámé či nekompensované vlivy prostředí,

nepřesnost etalonů a referenčních hodnot, nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních aj. [3]

3.2 Zdroje rušení a chyb

Mezi zdroje rušení patří negativní vlivy prostředí působící na inteligentní senzor. Lze do nich zahrnout vliv teploty, tlaku, vlhkosti, radiace, působení magnetického, elektrického, elektromagnetického pole a další vlivy prostředí. Do zdrojů rušení patří i zpětný vliv senzoru na měřený proces. Znamená to, že se měřená hodnota mění s vlivem senzoru. (např. dotykový teploměr změní teplotu v okolí styku senzoru s objektem). Další zdroj rušení vzniká v rozhraní nebo přístroji připojeném k inteligentnímu senzoru. Mezi rušivé veličiny tohoto typu lze zařadit zatěžovací impedanci, rušivé signály vedení nebo parazitní zemnicí smyčky. Vnitřní rušení inteligentního senzoru je způsobeno vnitřními vazbami bloků, oteplením, parazitními kapacitami a dalšími vlivy.

Zdrojem chyb inteligentního senzoru lze označit offset, drift, nelinearitu, chybu zesílení, aliasing efekt, hysterezi a příčnou citlivost.

Offset se objevuje na operačních zesilovačích ve vstupní části inteligentního senzoru (obr. 7) a dělí se na proudový a napěťový. Proudový offset představuje rozdíl velikosti vstupních proudů obou vstupů. Platí vztah

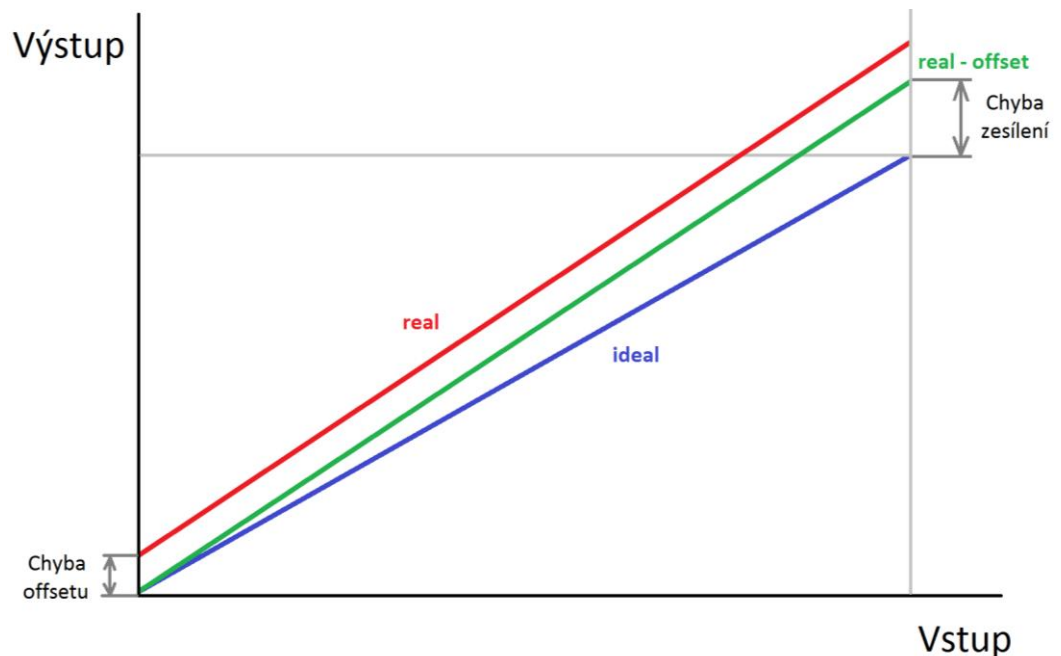
$$I_{OZ} = I_+ - I_- \quad (11)$$

Vstupní proudový offset vyvolá v konkrétním zapojení operačního zesilovače nenulové výstupní napětí $U_0 \neq 0$ i při nulovém diferenčním napětí $U_i = 0$ mezi oběma vstupy. Hodnota vstupní napěťové nesymetrie je hodnota napětí U_i na vstupu, při které je výstupní napětí skutečně nulové $U_0 = 0$.

Proudový a napěťový drift je změna proudového a napěťového offsetu v závislosti na teplotě, napájení či času.

Aliasing je děj, ke kterému může docházet při převodu analogového (spojitého) signálu na digitální (diskrétní). K převodu analogového signálu na digitální se používá vzorkování. Aby se zabránilo vzniku aliasingu, musí být splněna podmínka Shannonova teorému. To znamená že, vzorkovací frekvence musí být větší než dvojnásobek nejvyšší frekvence harmonických složek obsažených ve vzorkovaném signálu. Pokud není splněna podmínka a dojde ke vzniku aliasingu, dochází k překrytí frekvenčních spekter vzorkovaného signálu a tedy ke ztrátě informace.

Chyba zesílení vzniká při převodu signálu pomocí digitálně-analogovým (analogově-digitálním) převodníkem. Je vyjádřena jako odchylka od ideální křivky, při ignoraci chyby offsetu (obr. 8).



Obr. 8 Chyba zesílení a offset [8]

3.3 Eliminace Chyb

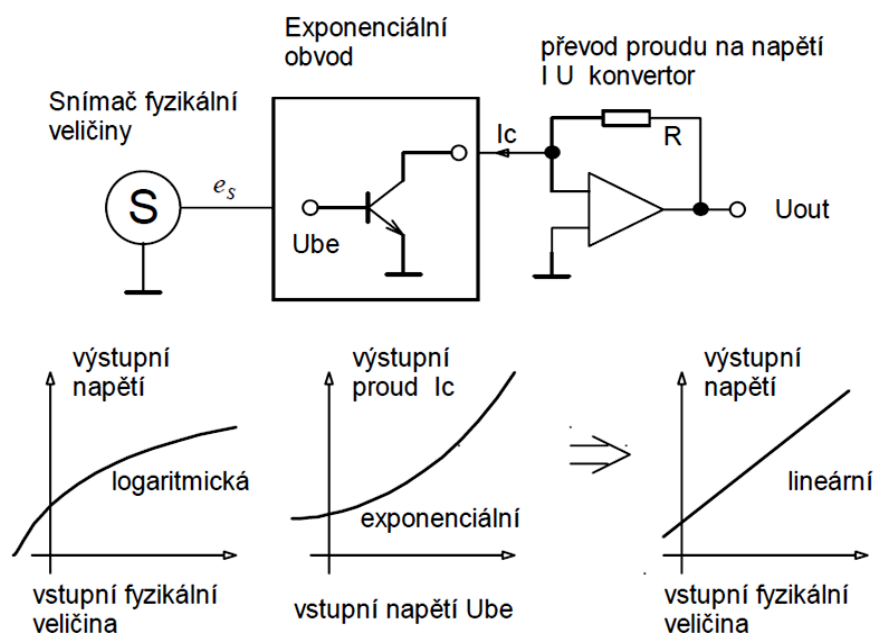
Potlačení chyb vzniká už při výrobě snímačů. Při výrobním procesu se snímače kalibrují a tím se dosahuje potřebných tolerancí snímačů. Tato kalibrace se preferuje na klasických senzorech. U inteligentních senzorů se od kalibračních metod při výrobě upouští a využívají se digitální metody. Do těchto metod lze zařadit autokalibraci či numerickou korekci, která upravuje převodní charakteristiku na základě předpovědi pomocí matematického modelu snímače. Nelinearitu vykazují určité snímače (termočlánky, snímače teploty, průtokoměry aj.) a je pro ně charakteristická. Chybu linearity těchto senzorů je možné považovat za systematickou chybu. Tyto chyby lze poměrně snadno odstranit linearizací pomocí interpolačních a aproximačních metod, popřípadě i kalibrací snímače. Spolehlivost a věrohodnost měření lze zajistit paralelním zapojením stejných čidel nebo více funkčně rozdílných čidel, které měří totožnou vstupní veličinu. Jestliže se vyskytnou rozdíly mezi měřenými hodnotami, tak se indikuje chybná funkce čidla. Inteligentní senzory monitorují měřenou veličinu a počítají základní statické parametry a sledují trendy. Také indikují neočekávané změny trendu, které mohou znamenat poškození čidla nebo poruchu

v technologii.

Vlivy okolního prostředí (např. teplota aj.) mají nežádoucí účinky na inteligentní senzor. Eliminace vlivu teploty lze docílit pomocí čidla, které ji měří. Toto čidlo přivádí signál do obvodů pro kompenzaci. Ty vyhodnocují vliv teploty na vnitřní části senzoru a jsou schopny upravit koeficienty obvodů, tak aby výstupní signál odpovídal měřené veličině a byl korektní. [8]

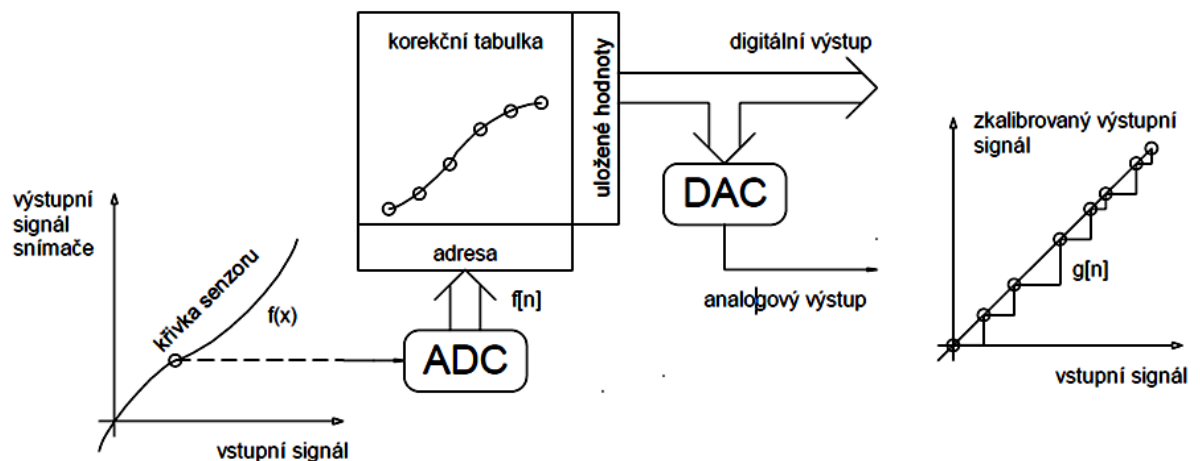
3.3.1 Linearizace

Linearizace má za úkol kompenzovat nelinearitu, která vzniká při převodu měřené veličiny na analogový signál. Lze ji provádět metodou analogové linearizace, metodou založenou na korekční tabulce, na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem, na aproximaci křivky a metodou založenou na minimalizaci chyb. Mezi nejzákladnější metodu linearizace patří tzv. analogová linearizace. Výstupní nelineární signál přivedený ze snímače je přiváděn do korekčního členu, který má přesně inverzní charakteristiku než je charakteristika snímače (obr. 9). Touto operací dochází k linearizování analogového signálu, který se dále zpracovává. Výhodou jsou dobré dynamické parametry, jako je mezní kmitočet a zpoždění. Nevýhoda této metody je teplotní závislost a problematická dlouhodobá stabilita parametrů korekčních členů.



Obr. 9 Analogová linearizace snímače [8]

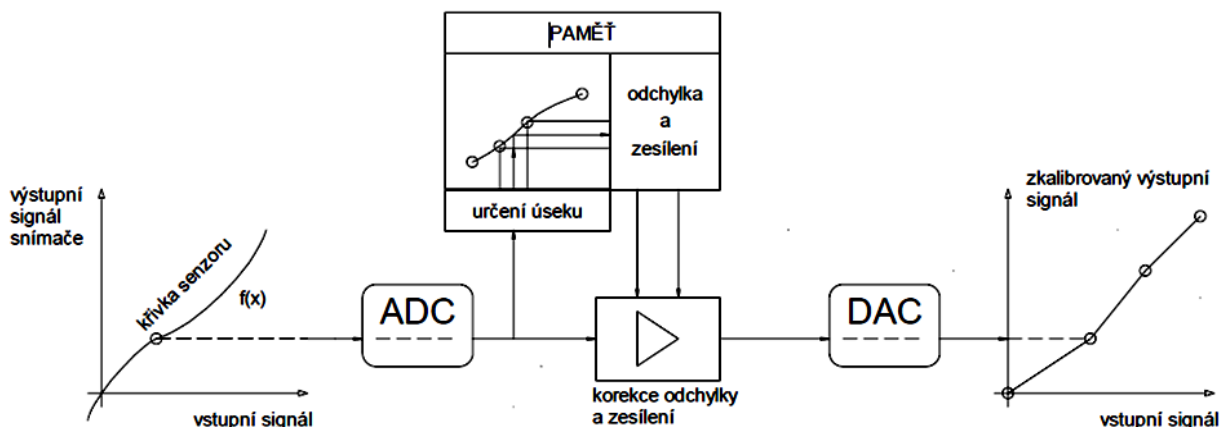
Další linearizační metodou je tzv. linearizace založená na korekční tabulce. Princip této metody využívá uloženou korekční tabulku v paměti mikroprocesoru a vyhledává hodnoty odpovídající výstupnímu signálu senzoru. V tabulce je zadaná inverzní funkce popisující snímač. Výstupní signál snímače se přivádí na vstup analogově-digitálního převodníku. Digitální výstup převodníku určuje adresu paměťového místa s korigovanou digitální hodnotou (obr. 10).



Obr. 10 Linearizace založená na korekční tabulce [8]

Výstupní signál po linearizaci je digitální. Je-li potřeba analogového signálu, musí se převést pomocí digitálně-analogového převodníku. Výhodou je vysoká rychlost, jednoduchá implementace a možnost linearizace současně s kalibrací snímače. Nevýhodou jsou vysoké nároky na paměť a na vytváření korekční tabulky.

Linearizace založená na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem rozděluje charakteristiku na jednotlivé úseky (obr. 11). Krajní body úseků odpovídají kalibrovaným bodům. Jednotlivé úseky jsou pak interpolovány přímkou nebo kalibrované body jsou po částech proloženy polynomem nebo splinem. Koeficienty odpovídající přímkce, polynomu nebo splinu jsou uloženy do paměti. Pomocí těchto koeficientů je pro každou měřenou veličinu vypočten odpovídající korigovaný výstup. Výhodou jsou menší nároky na paměť, kde stačí uložit jen rozsah jednotlivých částí a hodnoty koeficientů lineárních náhrad, na místo hodnot odpovídající celému rozsahu snímače. Nevýhodou je omezená přesnost pro velmi nelineární signály, kde je zapotřebí velkého množství úseků. Při použití interpolace polynomem se většina nevýhod odstraní za cenu zvýšení výpočetních nároků.



Obr. 11 Linearizace pomocí lineární interpolace [8]

Digitální verzi metody analogové linearizace je linearizace založená na aproximaci křivky. Tato metoda je vhodná pro potlačení systematických chyb. Výhodou jsou nízké nároky na paměť pro uchování koeficientů, malý počet kalibračních bodů přenosové charakteristiky a jeden výpočetní vztah pro celý rozsah snímače. Nejvyšší nároky jsou kladeny na výpočetní výkon, který je potřebný při výpočtech aproximace.

Linearizace založená na minimalizaci chyb využívá předběžný tvar přenosové charakteristiky a dostatečný počet kalibračních bodů. V linearizaci se používá metoda nejmenších čtverců a minimalizace chybové funkce. [8]

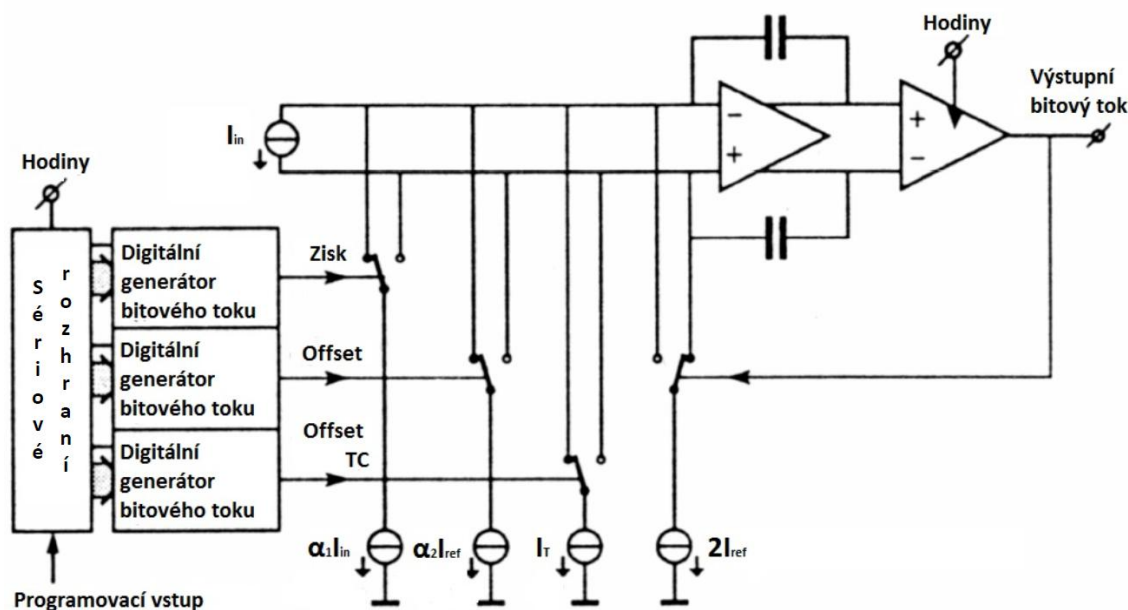
3.3.2 Kalibrace

Kalibrací je možné odstranit většinu chyb inteligentních senzorů, jako je offset, chyba zesílení, nelinearita, příčná citlivost, hystereze a drift. U inteligentních senzorů se neprovádí kalibrace při výrobě, ale kalibrace se provádí digitálním nastavením převodu v elektronice převodníku. Kalibraci lze implementovat do analogové části, číslicové části nebo do převodu analogového signálu na digitální.

V inteligentních senzorech se uplatňují základní kalibrace využívající úpravu analogového signálu. Kalibrace se provádí pomocí filtrů, zesilovačů, kompenzačních obvodů aj. Nejjednodušší kalibrací je změna zesílení a offsetu např. pomocí laserem trimovaných rezistorů, digitálně řízených rezistorů, spínaných kapacit aj. Složitější kalibrace využívají zesilovače s programovatelným zesílením a digitálně-analogovými převodníky. Tyto prvky slouží pro korekci offsetu, zesílení a korekci teplotních závislostí. Dále se používají proudově řízené děliče nebo programovatelná pole. Pro konkrétní řešení se používá kalibrace s násobícím digitálně-analogovým převodníkem nebo s digitálně-analogovým převodníkem,

který je řízený signálem pulzní šířkové modulace. Výhodou této metody je velká dosažitelnost šířky pásma a nevýhodou je dosažitelná přesnost, která dosahuje maximálně osmi až deseti bitů.

Další metodou je kalibrace využívající vlastnosti sigma-delta převodníků. Principem této metody je přidávání pomocného signálu se střední hodnotou, která je rovna požadované korekci. Typický obvod s programovatelným offsetem, zesílením a korekcí teplotních koeficientů je znázorněn na obr. 12.



Obr. 12 Obvod kalibrace využívající vlastnosti sigma-delta převodníku [8]

Nejmodernější metoda kalibrace je kalibrace využívající digitální zpracování signálu. Metoda využívá polynom s postupně narůstajícím řádem. Výhodou je vysoká univerzálnost a velmi snadná implementace i pro závislosti zachycující vliv příčné citlivosti snímače nebo vliv parazitních veličin. Mezi nevýhody patří vysoké nároky na výpočetní systém. [8]

3.3.3 Autodiagnostika

Základem autodiagnostiky je instalace jednoho nebo více akčních členů v blízkosti snímače. Tyto akční členy umožňují ovlivňovat vstupní neelektrický signál měřený čidlem. Výstupní signál snímače je zpracováván řídicí elektronikou, která ovládá aktuátor a současně sleduje jeho změny. Při situaci, kdy řídicí elektronika nedetekuje žádný chybový signál vyvolaný aktuátorem, je signál vyhodnocen jako chybový. Autodiagnostika probíhá během běžného provozu senzoru a tím se liší od kalibrace, která probíhá v definovaných laboratorních podmínkách. [8]

3.3.4 Autokalibrace

Autokalibrace je velmi podobná autodiagnostice. Rozdíl je v použití přesného aktuátoru a přidáním bloku pro korekci převodní charakteristiky snímače. Zde je zapotřebí aktuátor alespoň s přesností o řád vyšší, než je kalibrovaný snímač. Toto řešení je však obtížné, tak se používá pouze méně dokonalá kalibrace elektronické části. Automatická kalibrace elektronické části se běžně používá u analogově-digitálního přenosu. Měřená veličina, která se převádí pomocí snímače na elektrický signál. Výstupní signál ze senzoru se cyklicky nebo nepravidelně přepíná pomocí multiplexeru na napětí nulové U_0 , referenční U_R a na měřené U_X . Do paměti se ukládají konstanty D_0 , D_R a naměřený údaj D_X . Pomocí těchto konstant a vztahu (11) se vypočte měřené napětí. Tato kalibrace lze použít jen u některých typech senzorů (např.: termovizní systémy, snímače magnetického pole). Autokalibrace není schopna plně nahradit základní kalibraci, ale využívá se k monitorování parametrů senzoru a automatickou korekci offsetu a zesílení. Zásadní výhoda proti kalibraci je schopnost kompenzovat driftы během provozu. [8]

$$U_X = \frac{D_X - D_0}{D_R - D_0} U_R \quad (11)$$

3.3.5 Filtrace

Pomocí filtrace lze potlačit spektrum rušivých signálů. Spektrum rušivých signálů ležící mimo oblast spektra měřené veličiny lze filtrovat pomocí analogových a číslicových filtrů, které jsou zařazeny do měřicího řetězce inteligentního senzoru. Spektra rušivých signálů, které překrývají spektrum měřeného signálu lze odstranit dvěma způsoby. Rušivé veličiny, které se vyskytují již v citlivé části senzoru lze potlačit synchronním sběrem dat. Nashromážděná data se následně lineárně nebo exponenciálně průměrují. Rušivé signály vstupující do měřicího řetězce inteligentního senzoru až po transformaci na elektrický signál, lze potlačit amplitudovou modulací a demodulací. Pomocí filtrace lze eliminovat vliv překrývání spekter (aliasing).

Eliminace aliasingu se provádí před vzorkováním. Využívá se frekvenční oříznutí vstupního signálu pod $1/2$ vzorkovací frekvence, co nejstrmějším filtrem typu dolní propust. Anti-aliasing filtr mívá současně co nejmenší útlum v přenášeném pásmu. To zabrání vzniku aliasingu, ale ovlivní časový průběh vstupního signálu způsobem, který může být někdy nepřijatelný. Výsledkem jsou například překřivené odezvy na obdélníkový signál, což není přijatelné v mnoha aplikacích v měřicí technice.

Výhodou inteligentních senzorů je možnost plynulého nastavení parametrů filtru během snímání měřené veličiny. U klasických senzorů lze použít pouze pevně laděné filtry. Při změně rušivých signálů nemusí filtr potlačit všechny negativní signály. [4]

3.4 Porovnání inteligentních senzorů s klasickými senzory

Následující podkapitoly se budou zabývat výhodami a nevýhodami inteligentních a klasických senzorů.

3.4.1 Výhody inteligentních senzorů oproti klasickým senzorům

- Rozměrově kompaktní konstrukce – všechny obvody pro zpracování signálu v kompaktním pouzdře. Je zde zavedeno jedno napájení a výstup se standardizovaným signálem (analogovým, digitálním nebo kombinovaným).
- Přesun úlohy měření a zpracování signálu do místa senzoru – předzpracování a prvotní testování naměřených údajů. Spadá sem linearizace, hlídání mezí, autodiagnostika, trendy, filtrace aj.
- Decentralizované zpracování naměřených hodnot v rozsáhlých systémech – přesun obvodů pro zpracování signálu mimo centrální subsystém výrazně snižuje jeho zatížení. Uvolní se tak výkon, který lze použít pro jiné potřeby.
- Omezení a kompenzace rušivých vlivů – pomocí digitálního přenosu naměřeného signálu lze omezit negativní vlivy na měřící převodník a výstupní signál. Do negativních vlivů lze zahrnout vliv teploty, vibrací, rušení při přenosu aj.
- Kontrola integrity údajů – vyhodnocovací obvody inteligentního senzoru jsou schopny vyloučit fyzikálně rozporné výsledky. Pomocí obousměrné komunikace po sběrnici lze využít dálkové diagnostiky.
- Dálková diagnostika – pomocí obousměrné komunikace po sběrnici je usnadněné rozšíření inteligentních senzorů do těžko dostupných míst.
- Možnost zapojení senzorů do sítě – zapojením senzorů do sítě vzniká možnost adresace jednotlivých senzorů a lze je centrálně nastavovat a testovat. [8]

3.4.2 Nevýhody inteligentních senzorů oproti klasickým senzorům

- Vyšší cena.
- Omezené použití – menší odolnost vůči těžkým podmínkám. Do těžkých podmínek lze zahrnout vysoké teploty, agresivní prostředí, silné magnetické pole, rušení aj.
- Chybějící standardizace inteligentních senzorů v síti. [8]

4 Průzkum trhu

Následující podkapitoly se budou zabývat nabídkou trhu s inteligentními senzory, jejich použitím a budoucností vývoje.

4.1 Nabídka trhu

V dnešní době je mnoho firem, které se zabývají prodejem a výrobou inteligentních senzorů. Výběr vhodného inteligentního senzoru závisí na jeho použití a podmínkách, ve kterých má pracovat. Podle typu měřené fyzikální veličiny, kterou senzor měří, udává výrobce specifické parametry v katalogovém listu. Podle těchto parametrů lze vhodně vybrat z nabídky trhu vhodný inteligentní senzor. Nejčastěji udávané parametry jsou rozsah, tolerance, maximální přetížení, nelinearita, hystereze a parametry výstupního signálu. Na českém trhu se lze setkat s firmami nabízejícími inteligentní senzory, jako je Megatron s.r.o., Omnitron s.r.o., BHV senzory, Senzit s.r.o., HT-Eurep electronic spol.s.r.o., Turck s.r.o. a další. Většina českých firem působí jako zástupci mezinárodních výrobců inteligentních senzorů, jako je Maxim integrated, Emerson, Inelta, Smartec s.a.r.l., Yokogawa aj.

4.2 Použití inteligentních senzorů

Inteligentní senzory se vyskytují ve věcech, se kterými se setkáváme každý den. Najdou využití v počítačové technice, v seveřech, v regulaci a měření teploty, testovacích zařízeních, měřících zařízeních a dalších. Inteligentní senzory lze využít na měření teploty, tlaku, síly, průtoku kapali či plynů, vibrací, zrychlení a dalších. Níže jsou uvedeny konkrétní příklady použití inteligentních senzorů.

4.2.1 Měření teploty

Teplota patří k nejméně měřeným neelektrickým veličinám v oblasti průmyslové, spotřební regulace i počítačové techniky. Inteligentní snímače teploty již obsahují integrované čidlo teploty na chipu nebo rozhraní na připojení externího snímače teploty (např. PN přechod). Senzor převádí neelektrickou veličinu na elektrický signál. Ten dále zpracovává pomocí linearizace, korekce, redukce šumu, kalibrace aj. Upravený signál je posílán na jeho výstupy v digitálním zpracování. Je-li potřeba, tak pomocí digitálně analogového převodníku se signál převede na analogový.

Inteligentní senzor typ MAX 6680/6681 vyroben firmou Maxim je schopný dvoukanálového měření. Jedno čidlo je umístěno přímo na chipu a druhé je připojeno, jako externí snímač. Jako externí čidlo lze použít tranzistory NPN nebo PNP. U obou je možné naprogramovat úroveň teploty, při které se aktivuje signál OVERT, který může snížit hodinový signál nebo vypne monitorovací systém. Výstup ALERT informuje o získání nové naměřené hodnoty a může sloužit k hardwarovému přerušení řídicího systému (CPU). Tyto senzory se používají na místech, kde je potřeba sledovat či regulovat teplotu. Používají se například v klimatizacích, ve zpracování potravin, v regulaci topení, v testování a ke kontrole zařízení před přehřátím atd. Rozsah měření tohoto senzoru je $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, přesnost $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozlišení $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výstupní rozhraní je tvořeno dvou vodičovou sběrnicí kompatibilní s SMBUS. Výstupní signál je tvořen pomocí 10 bitového analogovo-digitálního převodníku s rychlostí převodu 62,5 ms.

Klasický senzor TF25 od firmy Thermokorm je určen pro kontaktní měření teploty. Rozsah měření tohoto senzoru je $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, výstupní signál je analogový. Zpracování výstupního signálu zajišťují systémy, ke kterým se senzor připojuje. Senzor je vhodný pro připojení k řídicím a regulačním systémům.

Rozdíly mezi inteligentním senzorem jsou ve výstupním signálu, který je u inteligentního senzoru digitální a je odolný vůči rušení. Inteligentní senzor dokáže informovat o různé teplotní hladině pomocí nastavitelné indikace. Teplotní rozsahy senzorů jsou rozdílné, ale ty jsou různé podle typů senzorů. [10]

4.2.2 Měření tlaku

Inteligentní senzory tlaku jsou důležitým nástrojem pro měření a řízení systémů v různých průmyslových oblastech. Základem těchto senzorů je deformační člen, který snímá změnu tlaku. Jako deformační člen se nejčastěji používají membrány. Deformace membrány se převádí pomocí mechanicko-elektrického převodníku na elektrický signál. Membrány se využívají pro měření statického tlaku bez skokových změn. Pro dynamická měření tlaku se využívají piezoelektrické převodníky. Inteligentní senzory tlaku obsahují bloky pro převod měřené veličiny na elektrický signál a jeho zpracování a úpravu elektrického signálu. Nechybí ani mikroprocesor, paměť a komunikace. Do paměti se během měření ukládají důležitá data o měření. Uložená data obsahují informaci o měřeném rozsahu, kalibraci senzoru, nastavení kalibračních mezí atd. Inteligentní senzory tlaku mohou být rozšířeny o funkci měření a korekci negativních vlivů (teplota) na senzor. Pomocí této funkce dokáže senzor zvýšit přesnost výstupního signálu. Senzory jsou schopny měřit ve více režimech. Mohou měřit tlak, podtlak nebo tlak i podtlak zároveň.

Jako příklad je uveden senzor od firmy Turck s.r.o. modelové řady PS500. Tento inteligentní senzor tlaku má široký rozsah měřeného tlaku. Rozsah měření udává od -10 kPa do 40 MPa. Přesnost výstupního signálu je 0,1 %. Senzor obsahuje dva tranzistorové spínací výstupy nebo jeden spínací a jeden analogový výstup. Pomocí těchto výstupů je možné sledovat snímaný tlak v centrálním zařízení. Do senzoru modelové řady PS500 je instalován čtyřsegmentový display, na kterém se zobrazuje snímaný tlak. Uživatelské prostředí umožňuje zobrazení tlaku v různých jednotkách. Senzor je chráněn pomocí robustní konstrukce před vnějšími vlivy (elektromagnetické rušení) a proti mechanickému poškození.

Klasický senzor pro měření tlaku od firmy BD Sensors typ DMP333 má rozsah 0 MPa do 40 MPa. Výstupní signál je analogový 4 mA – 20 mA. Přesnost výstupního signálu je 0,35 %. Z důvodu kontroly funkčnosti senzoru se používají pro nulovou hodnotu tlaku 4 mA. Senzor je vybaven konektorem pro připojení k řídicí a regulačním systémům.

Rozdíl mezi výše uvedenými senzory jsou v možnostech komunikace. Inteligentní senzor obsahuje zobrazovací jednotku, kterou klasický senzor nemůže obsahovat bez úpravy a zpracování signálu. Výhodou inteligentního senzoru je měření i záporného tlaku (podtlaku) a přesnost výstupního signálu. Signál je zpracováván v senzoru a dále ho lze pomocí sběrnice odesílat do centrálního systému. U klasického senzoru se musí signál upravovat v měřícím řetězci a dále elektronicky zpracovávat. [11], [12]

4.2.3 Měření síly

Inteligentní senzory síly převádějí pomocí převodníku měřenou sílu na elektrický signál. Jako čidlo se používá tenzometr. S klesající cenou a rostoucí přesností, vytlačují jiné typy převodníků síly na elektrický signál. Dnes se používají elektronické převodníky, do kterých se řadí odporové a polovodičové tenzometry. Princip tenzometrů je založen na jejich deformaci. Čidlo musí být pevně spojeno s měřeným materiálem. Jestliže se deformuje, mění se tím průřez materiálu a tím i měrný elektrický odpor. Odporové tenzometry používají ke změně odporu konstantanový drátek (0,01 mm) nebo kovové folie (0,001 mm). Polovodičové tenzometry však využívají piezorezistivní jev. Tento jev je založen na deformování monokrystalu polovodiče (křemík, germanium aj.). Pomocí proměnlivosti elektrického odporu se ovlivňuje signál, který je dále zpracováván.

Jako příklad jsou uvedeny senzory od firmy Megatron. Firma má širokou nabídku inteligentních senzorů síly. Nabízejí inteligentní senzory knoflíkové, ohybové a s-článekové.

Knoflíkové inteligentní senzory slouží k měření axiální síly. Tlakový čep je umístěn na horní straně snímače, na který působí měřená síla. Jejich výška se pohybuje v jednotkách milimetrů. Jako hlavní parametry výrobce udává měřený rozsah, maximální přetížení, nominální výstup, nelinearitu, hysterezi, přesnost nulové hodnoty aj.

Ohybové inteligentní senzory využívají k měření síly ohyb citlivé části. Senzory se jedním koncem upevňují na pevný podklad. Na druhý konec působí měřená síla a dochází k ohybu čidla. Takto lze měřit sílu v tlaku a tahu.

Inteligentní senzory síly typu s-článek připomínají svým tvarem písmeno S. Pomocí nich lze měřit sílu v tlaku i tahu ve svislé ose.

Firma Megatron nabízí možnost objednat senzory s různým rozhraním. Jako nadstandardní vybavení je uváděno možnost signalizace překročení mezí, možnost nastavení hysterezního spínání aj. Vše podle specifikace zákazníka lze naprogramovat.

Inteligentní senzor typ KTB52 od firmy Megatron má měřící rozsah tlaku od 500 N do 10 kN. Výstupní signál je unifikovaný a je na výběr z rozsahů 0 – 10 V nebo 0 – 20 mA. Přesnost nulové hodnoty je 0,2 % z rozsahu. Prodejce dává na výběr možnost komunikace. Senzor je možné připojit přes rozhraní USB, sériové rozhraní RS232 a RS485. Inteligentní senzor je schopen indikovat minimální a maximální hodnotu síly, kterou lze programově nastavit. Senzor dokáže detekovat přerušeni vodiče do 5 ms.

Klasický senzor pro měření síly od firmy Megatron typ KMB52 má měřící rozsah od 500 N do 10 kN. Výstupní signál má hodnotu 2 mV/V a déle se musí zpracovávat. Přesnost

nulové hodnoty jsou 2 % z rozsahu.

Rozdíly mezi výše uvedenými senzory jsou ve výstupním signálu. U inteligentního senzoru je výstupní signál digitální a je možnost připojení na rozhraní USB, RS232 a RS485. U klasického senzoru se signál musí dále zpracovávat regulačními nebo řídicími systémy. Přesnost nulové hodnoty je vyšší než u klasického senzoru. U inteligentního senzoru je více funkcí senzoru. Je schopen indikace přerušení vodiče a předem nastavených stavů. [13]

4.3 Budoucnost inteligentních senzorů

Senzoru se postupem času se zdokonalovali s vývojem elektroniky. První generace využívali základní fyzikální principy. V druhé generaci se začaly využívat fyzikální principy spojení s polovodiči. Díky pokroku v integraci elektrotechniky, bylo možné čidlo spojit s informační částí měřicího řetězce do kompaktních rozměrů. V třetí generaci se využívá technologie MEMS. Je to nejnovější technologie, která se používá ve výrobě senzorů. Do této generace spadají inteligentní senzory. Tato technologie začíná pronikat na trh. Mikro-Elektro-Mechanické Systémy (MEMS) využívají integraci mechanických elementů, čidel, akčních členů, řídicí a vyhodnocovací elektroniky na jeden křemíkový substrát prostřednictvím různých výrobních technologií. Mimo MEMS se využívají Mikro-Opto-Elektro-Mechanické systémy (MOEMS) k vývoji optických senzorů. Budoucnost součástek MEMS (MOEMS) spočívá v dosažení plně monolitické integrace MEMS (MOEMS) s řídicí elektronikou a obvody pro zpracování signálu na substrátu CMOS, tzn. bez nutnosti přidávat další vrstvy jiného složení. Plně monolitické řešení má své přednosti v miniaturizaci a zlevnění výroby díky snížení počtu výrobních kroků. S vývojem výrobních technologií, elektroniky a její integrací se budou inteligentní senzory zlepšovat a zpřesňovat. Použité součásti senzoru budou kvalitnější, přesnější, rychlejší a menší.

5 Závěr

Inteligentní senzory představují zásadní vývojový trend v měřicí technice. Hlavní výhodou inteligentních senzorů je, že na jeho výstupu je ověřená a přesná informace o měřené veličině. Přínosem inteligentních senzorů je zpracování signálu přímo v senzoru a ulehčení centrálnímu systému. Do výhod patří rozměrově kompaktní konstrukce, dálková diagnostika, možnost zapojení senzorů do sítě, kontrola údajů, omezení a kompenzace rušivých vlivů. Velkou nevýhodou je vyšší cena oproti klasickým senzorům, chybějící standardizace inteligentních senzorů v síti a nízká odolnost proti okolním rušivým vlivům. Tím je omezené použití do těžkých podmínek.

Jako chyby inteligentních senzorů lze označit offset, chybu zesílení, drift, nelinearitu, aliasing efekt, hysterezi a příčnou citlivost. Tyto chyby lze eliminovat různými způsoby. V této práci jsou uváděny metody sloužící k eliminaci těchto chyb. Jako první je uvedena metoda linearizace. Linearizace má kompenzovat nelinearitu vzniklou při převodu měřené veličiny na analogový signál. K linearizaci se používá metoda analogové linearizace, linearizace založená na korekční tabulce, linearizace založená na úsekové lineární interpolaci polynomem nebo splinem a linearizace založená na aproximaci křivky. Eliminace offsetu, chyby zesílení, hystereze, driftu a příčné citlivosti lze zajistit pomocí kalibrace. Ta se u inteligentních senzorů neprovádí při výrobě, jako u klasických senzorů, ale provádí se elektronicky. Další metodou je autokalibrace. Ta není schopna plně nahradit základní kalibraci, ale používá se k monitorování parametrů senzoru a automatickou korekci offsetu a zesílení. Výhodou oproti kalibraci je schopnost kompenzovat driftu během provozu. Autodiagnostika slouží k detekci chybových signálů během provozu senzoru. Použitím filtrace se eliminují spektra rušivých signálů, jako např. aliasing efekt. Výhodou inteligentních senzorů je plynulé nastavení parametrů filtru během snímání měřené veličiny. U klasických senzorů je pevně laděný filtr a nelze měnit jeho nastavení během provozu.

Nabídka trhu v dnešní době je široká. Je mnoho českých i zahraničních výrobců inteligentních senzorů i klasických senzorů. Záleží jen na požadavcích zákazníka. Mnoho firem nabízí jak standardní, tak i nadstandardní funkce. Vše záleží na tom, kde se senzor použije a k jakým účelům bude sloužit. Na trhu se lze setkat s inteligentními senzory pro měření teploty, tlaku, síly, vibrací, zrychlení, průtoku kapalin či plynů aj.

Inteligentní senzory se budou do budoucnosti zdokonalovat jak v přesnosti, rychlosti převodu, velikosti konstrukce a spolehlivosti. Zdokonalují s postupem vývoje elektroniky a její integrace. Senzory začínají využívat technologie MEMS nebo MOEMS. Tyto systémy

zaručují zmenšování senzorů a pomocí těchto systémů je možné integrovat čidla, akční členy, mechanické elementy, řídicí a vyhodnocovací elektroniku na jeden křemíkový substrát. Tato technologie začíná pronikat na trh, ale stále se vyvíjí. Budoucnost součástek MEMS (MOEMS) spočívá v dosažení plně monolitické integrace MEMS (MOEMS) s řídicí elektronikou a obvody pro zpracování signálu na jeden substrát CMOS. Tím dojde k miniaturizaci inteligentních senzorů a i zlevnění výroby, díky snížení počtu výrobních kroků.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Praha: SNTL, 1977.
- [2] *Senzory v mechatronických soustavách* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-mn-s-10_senzory_uvod.pdf
- [3] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření*. Praha: ČVUT, 2003. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_\(OCR\).pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_(OCR).pdf)
- [4] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREINDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-02057-6.
- [5] RIPKA, Pavel, Stanislav ĎAĎO, Marcel KREINDL a Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-0313-3.
- [6] WOJCIASZYK, Petr. *Smart sensors and wireless networks* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.akce.fs.vsb.cz/2005/http://asr2005/Proceedings/papers/519.pdf>
- [7] SMUTNÝ, Lubomír. *Měření a senzory*. Ostrava: VŠB, 2008.
- [8] BENEŠ, Petr. *Inteligentní snímače* [online]. Brno: FEKT, 2009 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf>
- [9] *Základní informace o A/D a D/A převodnicích* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://web.telecom.cz/macura/sazava3.pdf>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. *Inteligentní teploty* [online]. 2005 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005102402>
- [11] Odborné časopisy. *Inteligentní snímače tlaku série PS500* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34417
- [12] E-automatizace. *Tlakoměry v automatizaci* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.e-utomatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_v_automatizaci.htm
- [13] Megatron. *Katalog výrobků* [online]. [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.megatron.cz/download/megatron_16seiten_cz.pdf