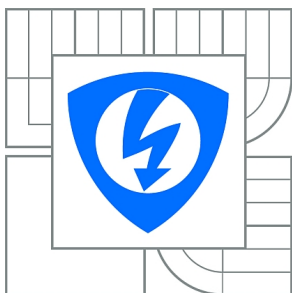


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

IMPLEMENTACE ROZHRANÍ IO-LINK DO SNÍMAČŮ TLAKU

IO/LINK INTERFACE IMPLEMENTATION TO PRESSURE SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

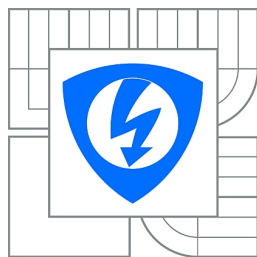
Bc. JIŘÍ PEŠL

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV KADLEC, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Jiří Pešl

ID: 72981

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Implementace rozhraní IO-Link do snímačů tlaku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti komunikace prostřednictvím rozhraní IO-Link a možnosti integrace tohoto rozhraní do snímačů tlaku. Na základě tohoto studia navrhnete a naprogramujete komunikační modul, který umožní komunikaci senzoru s nadřazeným systémem pomocí rozhraní IO-Link. Realizovaný komunikační modul musí být schopen plné komunikace dle standardu IO-Link. Pro tento modul vytvořte programové vybavení nadřazených systémů správy automatizačních procesů a ověřte jejich funkčnost v reálných výrobních podmínkách. Vytvořené a odladěné zdrojové programy detailně okomentujte. Celou práci včetně příloh dodejte také na CD.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Kadlec, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá nejprve problematikou měření fyzikálních veličin. Jsou zde popsány snímače v obecné rovině a požadavky na snímače, které přináší poslední trendy v oboru automatizace. Práce se zvláště zabývá snímači pro měření tlaku a jejich připojení do automatizačního řetězce. V další části se práce zabývá návrhem převodníku pro připojení inteligentních snímačů tlaku využívajících ke své činnosti komunikačního protokolu HART k zařízením řízených prostřednictvím komunikačního protokolu IO-Link. Nejprve budou podrobně popsány jednotlivé komunikační standardy dle ISO OSI modelu a z tohoto teoretického základu bude vycházet samotný návrh převodníku z komunikačního protokolu HART na komunikační protokol IO-Link. V poslední části pak bude navrženo programové vybavení převodníku.

Klíčová slova:

Měření tlaku, snímače tlaku, inteligentní snímače, komunikační protokol HART, komunikační protokol IO-link, převodník komunikačního protokolu HART na IO-link, HART modem, IO-Link linkový zesilovač, AD převod proudové smyčky.

Abstract:

This thesis is concerned with the measurement of physical quantities. Thesis describes sensors in general terms and requirements, which delivers latest trends in the field of automation. The main theme of this thesis is sensors for measuring pressure, and their connection to the automation chain. In the next part thesis describes the design of the converter for connecting SMART sensors for pressure measuring, that use HART communication protocol, to the automation systems managed by a communication protocol IO-link. First will be described in detail various communication standards by their ISO OSI model, and on this theoretical basis will be based design of converter between communication protocol HART and communication protocol IO-Link. The last part will be designed software for this converter.

Key words:

Pressure measurement, pressure sensors, intelligent sensors, HART communication protocol, IO-link communication protocol, HART communication protocol to IO-link communication protocol converter, HART modem, UART, IO-Link line driver, AD conversion of current loop.

Bibliografická citace:

PEŠL, J. *Implementace rozhraní IO-link do snímačů tlaku: Diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 65 s., 1 příl.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou Diplomovou práci na téma **Implementace rozhraní IO-link do snímačů tlaku** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Diplomové práce, a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené Diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2014

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu Diplomové práce Ing. Jaroslavu Kadlecovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 29. května 2014

.....
podpis autora

OBSAH:

.....	11
1. Teoretický úvod:.....	13
1.1. Úvod do problematiky měření tlaku.....	13
1.2. Snímače tlaku	13
1.3. Možnosti inteligentních snímačů tlaku.....	14
1.4. Používaná komunikační rozhraní.....	14
2. Komunikační protokol HART.....	16
2.1. Obecná specifikace protokolu HART.....	16
2.2. Fyzická vrstva standardu HART	17
2.2.1. Přenos signálů.....	17
2.2.2. Elektrické propojení a topologie.....	18
2.2.3. Transportní kanál přenosu dat:.....	19
2.2.4. Hart modem.....	20
2.3. Datová vrstva standardu HART.....	20
2.4. Aplikační vrstva protokolu HART.....	25
3. Komunikační protokol IO-link:	26
3.1. Obecná specifikace standardu IO-link.....	26
3.2. Fyzická vrstva standardu IO-link	27
3.2.1. Topologie a elektrické propojení:.....	27
3.2.2. Komunikační módy.....	28
3.3. Datová vrstva standardu IO-link.....	29
3.3.1. Datové kanály:.....	29
3.3.2. Posloupnost vysílaných dat a cyklus přenosu:.....	30
3.3.3. Struktura jednotlivých typů provozních bytů v datovém rámci jednoho cyklu	31
3.3.4. Kontrola podélné parity a její komprese:.....	32
4. Převodník z komunikačního protokolu HART na IO-link protokol.....	34
4.1. Návrh zapojení modulu mikrokontroléru.....	35
4.1.1. Výpočty hodnot resistorů:.....	36
4.2. Návrh zapojení modulu HART modemu s AD převodníkem.....	36
4.2.1. Zapojení Integrovaného obvodu DS8500:.....	36
4.2.2. Vytvoření uzlu o napětí 1.235V:.....	37
4.2.3. Výpočet diodového napěťového děliče.....	38
4.2.4. Zpracování měřonosného signálu proudové smyčky:.....	38

4.2.5. Výpočet pólu přenosu dolní propusti:	39
4.3. Návrh zapojení modulu linkového zesilovače IO-link	39
4.4. Nároky a realizace napájení	40
5. Závěr:	42
6. Bibliografické citace:	43

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. 1. Ilustrace k definicím jednotek tlaku.	13
Obr. 2. ISO OSI model standardu HART	17
Obr. 3. Ukázka superpozice frekvenčně klíčovaného signálu a proudové smyčky[3].	18
Obr. 4. Sběrníková topologie HART standardu.	19
Obr. 5. Hvězdicová topologie HART standardu.	19
Obr. 6. Transportní kanál standardu HART[3].	20
Obr. 7. Vnitřní zapojení HART modemu[6].	20
Obr. 8. Struktura rámce jednoho přeneseného bytu rozhraním UART	21
Obr. 9. Struktura rámce protokolu HART	21
Obr. 10. Struktura dat v bytu oddělovače.	22
Obr. 11. Ukázka pozic v krátké adrese[3].	23
Obr. 12. Ukázka dlouhé adresy[3].	24
Obr. 13. Ukázka parit využívaných při kontrole komunikace[3].	25
Obr. 14. ISO OSI model IO-Link standardu[5].	27
Obr. 15. Topologie IO-link rozhraní.	27
Obr. 16. Možné provedení IO-Link rozhraní[5].	28
Obr. 17. Ukázka jednoho přeneseného datového rámce jednoho cyklu[5].	30
Obr. 18. Struktura bytu CMD [5].	31
Obr. 19. Struktura bytu CKT [5].	31
Obr. 20. Struktura bytu CKS [5].	32
Obr. 21. Kompresce podélné parity [5].	32
Obr. 22. Blokové schéma převodníku.	35
Obr. 23. Typické zapojení HART modemu na straně zařízení typu Master[12].	37
Obr. 24. Schéma diodového napěťového děliče	37
Obr. 25. Úprava měronosného signálu.	38
Obr. 26. Zapojení operačního zesilovače jako dolní propusti	39

Obr. 27. Typické zapojení IO-link linkového zesilovače MAX14821[8].....	40
---	----

Úvod

V moderním světě elektrotechniky a zvláště pak ve světě výrobních zařízení se setkáváme čím dál častěji s fenoménem automatizace procesů. Může jít o jednoduchý stroj nebo plně automatizovanou výrobní halu s tisícovkami různě složitých strojů. Jde zde především o dva důležité aspekty proč automatizovat nějaký proces. Jako první se nám vybaví určitě ekonomický přínos automatizace, kdy stroj na rozdíl od člověka může pracovat 24 hodin denně a mnohonásobně rychleji. Další velký přínos automatizace výrobních procesů spočívá v odstranění lidského faktoru působícího v daném výrobním procesu většinou negativně. Aby bylo možné výrobní proces řídit automaticky, je nutné o tomto procesu získávat data na něž je nutné odpovídajícím způsobem reagovat, a která odpovídají vlivům působícím na tento proces. Tyto vlivy bývají většinou reprezentovány nějakou fyzikální veličinou. Z potřeby měřit tyto veličiny vznikl celý vědní obor jenž nazýváme senzorika, který se zabývá popisem, vynalézáním a vylepšováním převodníků veličin na signál se kterým již výpočetní jednotky automatizovaných provozů umějí počítat. Takovému převodníku se říká snímač a při vzniku stále složitějších výrobních zařízení vynikají i nové nároky a potřeby, se kterými se moderní snímače musejí umět vyrovnat. V následujících řádkách bude vysvětleno mnohé ze světa senzoriky a budou zde některé tyto potřeby podrobně diskutovány.

1. Teoretický úvod:

1.1. Úvod do problematiky měření fyzikálních veličin

V dnešním technickém světě a zvláště v oblasti automatizace výrobních procesů je měření fyzikálních veličin jednou z nejdůležitějších činností. Jelikož kvalita a spolehlivost výrobního procesu velkou měrou závisí právě na typu použitých snímačů, jejich spolehlivosti a citlivosti. Tato skutečnost stojí za vznikem samostatného vědního oboru velmi úzce spjatého s obory elektroniky a fyziky. Tento obor se nazývá sensorika a zabývá se především popisem mechanismů snímání různých fyzikálních veličin a jejich převodem na měronosný signál.

1.2. Důležité pojmy z oboru sensoriky

V první řadě je nutné definovat několik pojmů z tohoto relativně nového a velmi rozsáhlého oboru.

Senzor, snímač nebo také **čidlo** jsou pojmy označující zařízení s jejichž pomocí lze získat hodnotu veličiny potřebné pro správné řízení výrobního procesu. Existuje nepřehledné množství různých druhů senzorů a pro lepší orientaci mezi nimi bylo nutné, zavést jejich dělení do různých kategorií nejen podle veličin na jejichž snímání jsou senzory určeny, ale také podle jejich výstupních měronosných signálů či vnitřních elektronických prvků, jejich funkcí a složitosti.



Obr. 1. Ilustrační obrázek různých průmyslových snímačů

Dnešní technická praxe snímače dělí dle různých hledisek na různé skupiny:

1.2.1. Dělení senzorů

Nejčastěji uváděné dělení snímačů bývá podle veličin na jejichž měření jsou snímače určeny:

- **Senzory pro snímání geometrických veličin**, s jejichž pomocí měříme vzdálenost, polohu, posunutí atd.
- **Senzory pro snímání mechanických veličin**, s jejichž pomocí lze zjistit například rychlost, zrychlení, sílu, tlak, průtok, či mechanické napětí
- **Senzory pro snímání teplotních veličin**, s nimiž měříme především teplotu a její tok
- **Senzory pro snímání elektrických a magnetických veličin**. U těchto snímačů jsou to všechny veličiny spojené s elektromagnetismem. Například napětí, proud, elektrický odpor, intenzity elektrických a magnetických polí.
- **Senzory pro snímání intenzity záření**. Pomocí těchto snímačů lze měřit například intenzitu elektromagnetického záření ve všech oblastech spektra či radiaci nebo také intenzitu šířícího se mechanického vlnění.
- **Senzory pro snímání chemických veličin** se používají nejčastěji pro měření složení látkového prostředí. To může být například koncentrace iontů v roztoku nebo přímo přítomnost nějakého prvku a podobně.
- **Senzory pro snímání biologických veličin**. Jsou nejmladší kategorií, která vznikla především z důvodu pokroku v oboru lékařské diagnostiky a měří se především přítomnost či koncentrace určitých organických sloučenin.

Dále lze snímače dělit podle výstupních veličin a jejich vlastností na:

- Senzory jejichž výstupní měronosný signál představuje **elektrická veličina**. To může být elektrické napětí nebo proud a v mnoha případech i jejich frekvence. Tato kategorie je v dnešním technickém světě nejvíce využívána.
- Senzory jejichž měronosný výstupní signál představuje **optická veličina**. Může to být například intenzita optického záření či přítomnost určitých složek v jeho spektru. Tato kategorie zažívá v posledních letech velký rozmach především z důvodů pokroku v oblastech integrované optiky a optických komunikací.
- **Senzory s mechanickým ukazatelem**. Tato skupina je v poslední době na ústupu, jelikož tyto snímače jsou pro oblast automatizace naprosto nepoužitelné. Slouží už pouze pro orientační účely obsluhy strojů nebo k indikacím stavu zařízení.
- Do této kategorie patří i dělení podle toho zda výstupní signál má **analogový** či **digitální** charakter.

Dělení podle principu převodu vstupní veličiny na veličinu výstupní:

- Sensory s **fyzikálním převodem**. U této kategorie jde vždy o využití určitého fyzikálního jevu. Například u termočlánku jde o jev termoelektrický a u platinových odporových snímačů teploty o jev termorezistivní obojí přitom využíváme pro převod teploty na elektrický signál.
- Sensory s **chemickým převodem**. Jejich mechanismus převodu bývá většinou založen na chemické reakci.
- Sensory s **biochemickým převodem**. Tyto senzory využívají ke své činnosti biologicky aktivní látky.

Snímače můžeme klasifikovat také podle:

- styku senzoru s měřeným prostředím na **dotykové a bezdotykové**.
- chování výstupu na **aktivní a pasivní**, přičemž u aktivních senzorů se výstup chová jako zdroj signálu a u pasivních jde většinou o změnu parametru a senzor je většinou součástí elektrického obvodu vyhodnocujícího tento parametr.
- mechanismu převodu na senzory s **jednoduchým a několikanásobným** převodem, kdy záleží na tom, jestli se měřená veličina převádí na měronosný signál přímo nebo, zdali je využito převodu na neelektrickou veličinu a poté až pomocí dalšího převodu na veličinu elektrickou.

Podle posledních trendů v oblasti senzoriky je nutné uvést i dělení senzorů podle jejich složitosti na:

- **klasické** senzory, kdy výstup je vždy definován určitým neměnným matematickým vztahem.
- **SMART** senzory, kde u těchto senzorů existuje vždy vnitřní logický obvod a nějaké komunikační rozhraní, s jehož pomocí lze měnit parametry senzorů, jako jsou jejich rozsah a parametry kalibrační křivky nebo lze pomocí této komunikace provádět vzdálenou diagnostiku senzoru.
- **MEMS** (micro-electro-mechanical-systems) senzory, které v poslední době tvoří nejrychleji se rozvíjející oblast snímačů. Tato evoluce je podnícena především pokroky v technologiích výroby polovodičových struktur.

1.2.2. Vnitřní složení senzorů

Jak již bylo nastíněno, každý senzor se může skládat z několika různých a navzájem propojených částí, kdy naprosto nezbytnou součástí senzoru je převodník.

Převodník je vnitřní část senzoru, která má funkci samotného převodu fyzikální veličiny na veličinu měronosnou. U jednoduchého fyzikálně-elektrického převodu jde většinou o vnější ovlivňování materiálového parametru definované struktury měřenou veličinou, na který poté reaguje vyhodnocovací obvod senzoru, jenž podle tohoto parametru a předem definovaných závislostí nastaví velikost výstupního signálu.

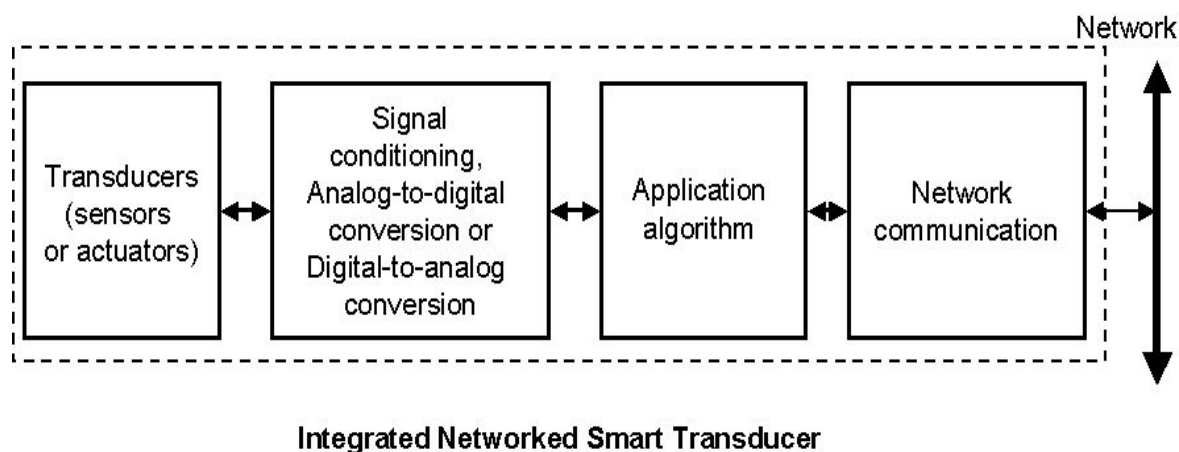
Další částí senzoru bývá tzv. **vyhodnocovací elektronika**. Jedná se o elektronický obvod, s jehož pomocí se parametr převodníku využívající k převodu na elektrickou veličinu zpracovává na definovaný elektrický signál výstupu. U převodů přímých, tj. z elektrické veličiny na elektrickou veličinu, to bývají většinou analogové obvody s operačními zesilovači nebo obvody rezonanční s následným převodem. Pokud se jedná o senzor s limitním digitálním výstupem bude použito nejspíše analogového komparátoru. Pokud se jedná o senzor s digitálním výstupem v podobě digitálního signálu o datové šířce větší než 1, bude tento blok tvořit řetězec elektronických obvodů, kde první v tomto řetězci bude analogové zpracování signálu operačními zesilovači. Dalším článkem pak bude analogově digitální převodník a v poslední řadě logický obvod, který signál uloží do paměti a na dotaz odešle do nadřazeného zařízení.

U inteligentních tzv. SMART snímačů jsou digitální obvody podmínkou. Tyto obvody mají nenahraditelnou funkci nejen jako řadiče komunikačních rozhraní, ale také jako obvody pro řízení samotné konverze fyzikální veličiny na měronosnou. V praxi totiž funguje že při převodu někdy závisí měronosná veličina mnohdy i na fyzikálních podmínkách v prostředí. U měření mnoha veličin je pak naměřená hodnota závislá na teplotě nebo jiné veličině a měnící se veličina zavádí do konverze chybu měření. Pokud budeme tuto veličinu měřit také a budeme znát matematickou prezentaci závislosti měřené veličiny na teplotě, můžeme jednoduchou matematickou operací tuto chybu eliminovat. Z tohoto důvodu je nutné do řetězce zapojit elektronické digitální zařízení, kde lze tento matematický aparát aplikovat v podobě posloupnosti logických operací. Takovýto závislostí působí při konverzi někdy velmi mnoho, některé mají na proces konverze větší vliv, než jiné. Pokud je možné z hlediska velikosti zavedené chyby vlivy těchto závislostí zanedbat, můžeme říci, že hodnota konverze je velice blízká ke skutečné hodnotě s chybou do desetiny procenta. V takovém případě vlivy zanedbáme. Počítáme pak jen s těmi které zavádějí větší chybu. Matematický aparát se zmenší, a pro následné matematické zpracování konverze nám postačí obyčejný mikrokontrolér. Někdy naopak nemůžeme zanedbat žádnou z chybových veličin a

matematický aparát pak může být tak složitý, že pro výpočet měření je nutno využít superpočítačů, jako je tomu například u detektorů využívaných při náročných fyzikálních pokusech např. super-urychlovač v CERNU, připravovaný projekt ITER, americké pokusy s vysoko-výkonovými lasery a spousta dalších.

U převodníků, které využívají jako mechanismu převodu působení měřené veličiny na elektrickou materiálovou konstantu mnohdy dochází ke stárnutí materiálu a tak i změnám parametrů konverze. Toto je nutné eliminovat a v praxi se řeší tento problém tzv. kalibrací snímače. To je proces při kterém umístíme snímač do prostředí sdíleného se snímačem s vyšší třídou přesnosti a proměří se charakteristiky obou snímačů zároveň. Z naměřených charakteristik se pak vypočítá takzvaný korekční faktor pokud je chyba v celém rozsahu stejná nebo korekční funkce pokud je chyba závislá na hodnotách měřené veličiny v daném rozsahu měření rozdílně. Tato naměřená data je poté nutné zavést do matematického aparátu konverze, který v našem případě nahrazuje mikrokontrolér s jeho programovým vybavením.

Potřeba aktualizovaných dat zavedla do komunikačních standardů snímačů nejen to aby se dala jednosměrně vyčítat naměřená hodnota snímačem ale i druhý směr, kdy je potřeba do logické jednotky snímače zavádět data. Vzniklo tak mnoho komunikačních standardů a některými z nich se bude zabývat další část práce.



Obr. 2. Blokový diagram SMART senzoru[]

1.2.3. Důležité parametry snímačů:

Přesnost - míra chyby převodu měřené veličiny podle níž se senzory řadí do různých tříd přesnosti

linearita – charakter změny měřenosného signálu proporcionálně se změnou tlaku

hystereze – vlastnost kdy se signál při jednom směru měření v rozsahu liší od signálu který naměříme ve směru druhém

trvanlivost - schopnost odolávat cyklickému zatížení při měření v cyklech vysokého a nízkého tlaku.

stabilita – parametr určující zachování kalibrace

ochrana proti elektronickému rušení

teplotní rozsah - schopnost tolerovat extrémní teploty okolního prostředí)

fyzická odolnost - schopnost přestát tlakové špičky, nárazy a vibrace

meze praktického rozsahu – určují meze pracovního tlaku ve kterých udává snímač hodnotu s chybou určenou jeho zařazením do třídy přesnosti

bezpečnost - vhodnost pro použití v nebezpečném a výbušném prostředí

spotřeba energie

konstrukční materiál – udává většinou teplotní meze požití snímače a jeho odolnost vůči korozi

cena – jedno z nejdůležitějších kritérií užívaných při výběru snímače [20]

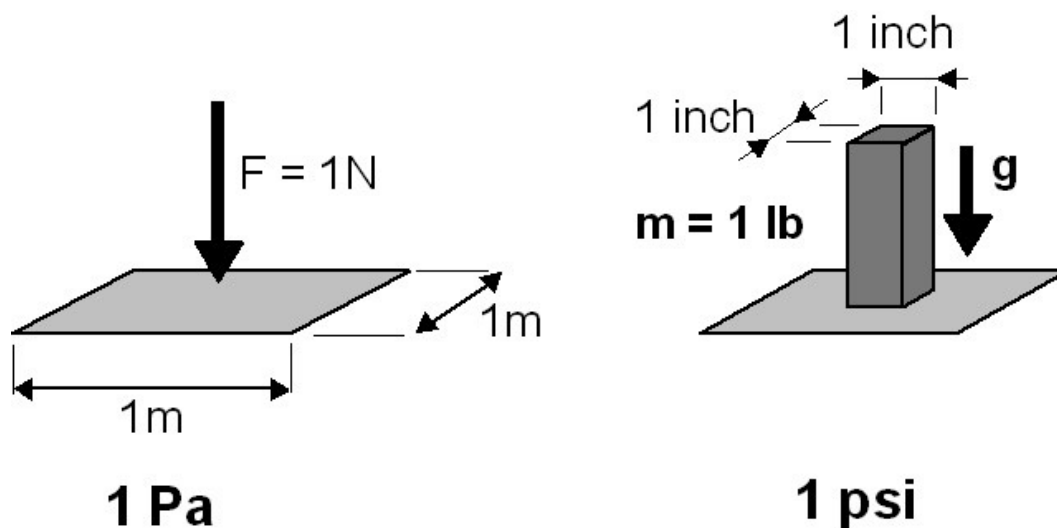
1.3. Problematika měření tlaku

1.3.1. Definice tlaku jako fyzikální veličiny

V první řadě je nutné definovat co je to tlak. Tlak je z makroskopického hlediska fyzikální veličina definovaná jako síla spojitě a rovnoměrně působící v kolmém směru na obsah určité plochy. Jednotek tlaku je užíváno více, v soustavě SI se používá jednotka „Pascal“ což je tlak, který vyvolá síla jednoho newtonu rovnoměrně a spojitě rozložená na plochu o obsahu jednoho metru čtverečního. V technické praxi se však můžeme ještě dnes setkat s jednotkami torr, bar, atmosféra, kilopond a v anglosaských zemích pak s jednotkou „psi“ což je silový účinek tělesa o hmotnosti jedné libry, na které působí gravitační zrychlení a tento silový účinek působí spojitě a rovnoměrně na plochu o obsahu jednoho palce čtverečního. [10] [11]

Rovnice odvození jednoho pascalu jako jednotky tlaku:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{kg \cdot m \cdot s^{-2}}{m^2} = 1 Pa \quad (1)$$



Obr. 3. Ilustrace k definicím jednotek tlaku

Makroskopická definice tlaku vyvolaného tíhovou silou nám umožňuje dobrou představu o tom, co se pod pojmem tlak vlastně míní. Pokud se však zaměříme na tlak v plynech či kapalinách budeme muset brát celou definici z mikroskopického hlediska a celá představa získá mnohem větší složitosti.

Tlak v plynech nazývaný též atmosférický se nemůže definovat přímo vahou plynového tělesa jelikož plyny nemají stálý tvar a musí se tak brát jako jednotlivé částice v prostoru. Každý fyzikálně vzdělaný člověk ví, že takové částice náhodně kmitají v prostoru a náhodně do sebe narážejí. Mají tak tepelný pohyb, který má náhodný charakter a z makroskopického hlediska se jeví jako nulový. Pokud si tedy vezmeme plyn jako jednotlivé částice, kdy každá má svojí hmotnost a tepelnou rychlost danou tepelnými kmity a soubor těchto částic umístíme do uzavřené nádoby, můžeme definovat tlak jako silový účinek dopadajících částic, kolmý na jednotku plochy stěny nádoby. Jelikož tato síla je úměrná počtu dopadajících částic, bude se rostoucí koncentrací částic v jednotce objemu měnit i tlak.

U kapalin se definuje takzvaný hydrostatický tlak. Je definován jako hydrostatická síla, která působí na plochu dna nádoby vyvolaná výškou kolmého sloupce kapaliny v gravitačním poli země.

1.3.2. V praxi se nejčastěji používají tyto pojmy:

- Absolutní tlak** - je to tlak měřený od nulového tlaku
- Nulový tlak** - je tlak absolutního vakua (prostor bez jakékoli hmoty)
- Atmosférický tlak** - je absolutní statický tlak zemské atmosféry měřený u zemského povrchu
- Vakuum** - podtlak(tlak nižší než atmosférický)
- Rozdílový tlak** - je dán rozdílem hodnot dvou současně působících tlaků[10]

1.3.3. Vakuum

Vakuum je speciálním pojmem. Myslí se tím tlak v prostoru s nízkou koncentrací částic. V technické praxi jde nejčastěji o nádobu ze které byly odebrány částice a kde tak nedochází ke srážkám částic se stěnami nádoby. Nebo o volný prostor mimo atmosféru země kde je koncentrace částic rovněž neutrální. Vakuum se hojně využívá při výrobních procesech kdy je vyžadována vysoká čistota nebo při procesech, při kterých je nutné odvádět plyny vznikající při procesu. Významnou oblastí použití vakua je potravinářský průmysl který vakuum používá při balení potravin pro dlouhodobé uchování nebo nízkoteplotní sušení potravin.

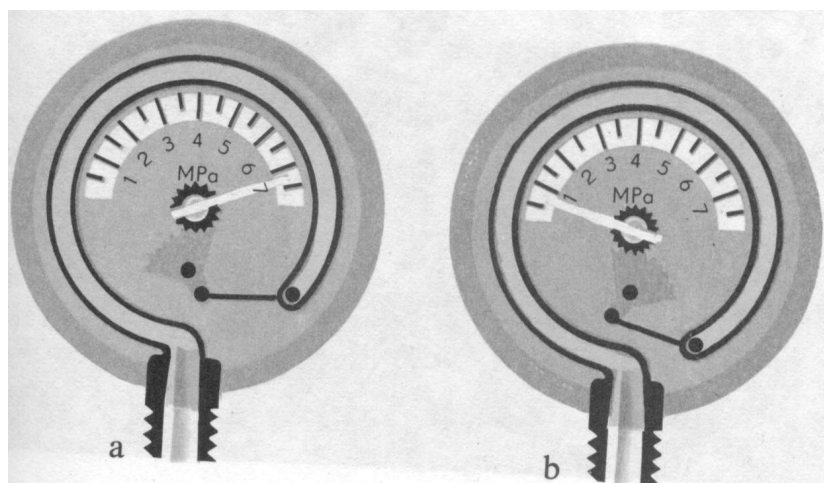
1.4. Snímače tlaku

Pro měření tlaku se v technické praxi používá velké množství typů snímačů lišících se konstrukcí, principem převodu tlaku na měřenosný signál, který v našem případě představuje elektrický signál nebo pro nenáročné aplikace stačí i signál mechanický v podobě natočení ručičky před noniusem. V tomto případě jde pouze o informativní měření.

Na konstrukci snímače závisí především citlivost a měřitelný rozsah. Pro měření vyšších tlaků jde ve většině případů o měření deformace pružného členu nejčastěji v podobě membrány, na kterou působí z jedné strany tlak měřený a z druhé strany tlak referenční. Výsledná deformace je přímo úměrná rozdílu tlaků. Převod na elektrický signál je realizován tenzometricky, kapacitně, opticky atd. Úplně jiné je měření vysokého vakua kde se využívá více vlastností plynu samotného. Jde především o Piraniho vakuometr, který využívá principu odvodu tepla plynem z vyhřívaného drátku. Tento vakuometr využívá závislosti proudu drátkem na teplotě a plynem odváděného tepla, nebo u ionizačních snímačů se využívá změny střední volné dráhy elektronu nepřímo závislé na tlaku a jako měřenosné veličiny se využívá proudu výboje. U měření vakua se často používají kombinované systémy, jelikož se vakuové aparatury provozují ve velkém rozsahu od atmosférického tlaku 10^5 Pa do tlaků řádu až 10^{-7} Pa. Je běžnou praxí takovéto systémy vybavit některou z automatizačních metod nejčastěji za pomoci mikrokontroléru.

1.4.1. Manometr

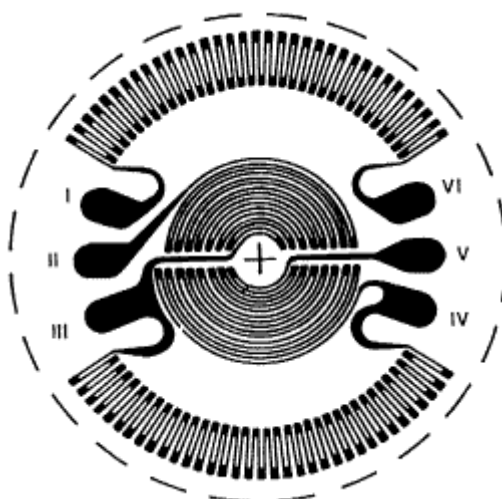
Manometr je základním měřidlem tlaku. Najdeme ho na všech tlakových nádobách a systémech od hasicích přístrojů přes lahve s technickými plyny po obrovské zásobníky zemního plynu. Jde principiálně o nejjednodušší převod tlaku na měřenosnou veličinu. Převodník zde tvoří ohnutá slepá trubice, do které je zavedeno měřené médium. Tlak uvnitř trubice napíná trubici a způsobuje její deformaci, která se pomocí táhla a ozubených převodů přenese na natočení ukazatele.



Obr. 4. Manometr[18]

1.4.2. Tenzometrické měření tlaku

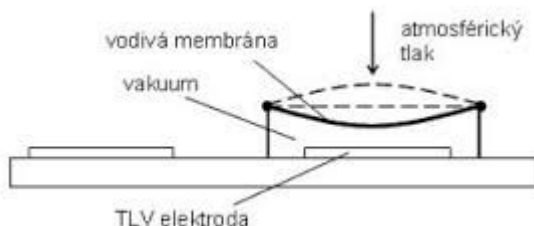
U tohoto typu převodu tlaku na elektrický signál je nejčastěji použito membrány coby deformačního členu. Na membráně je často tenkovrstvou technologií nanesen meandr vodivého materiálu. Při deformaci této membrány se s poměrným prodloužením jejího povrchu mění délka meandru který je podélně namáhán a mění se i jeho průřez. V důsledku toho se mění i elektrický odpor tenkovrstvé struktury. Přivedeme-li na strukturu definované napětí či externím proudovým zdrojem vybudíme proud strukturou tak po patřičném zesílení a odečtení hodnoty při nulové deformaci se získá měronosný signál v podobě elektrické veličiny, jež může být dále zpracována do digitální podoby pomocí AD převodníku.



Obr. 5. Tenzometrický snímač tlaku[19]

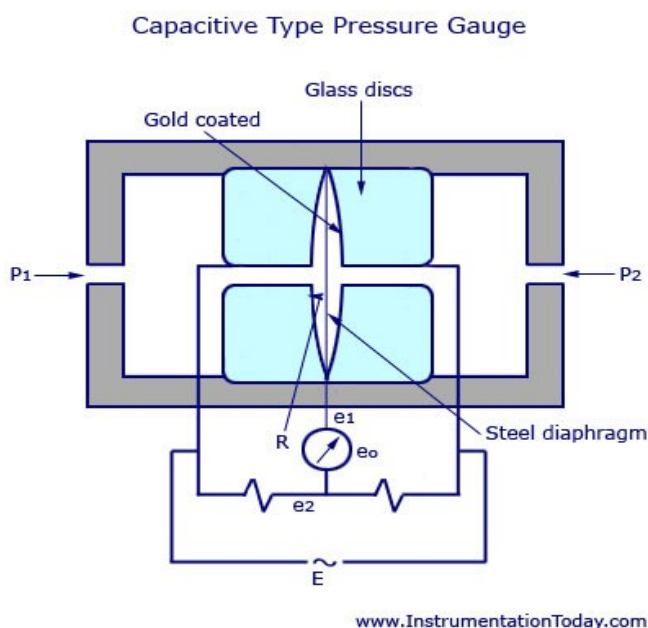
1.4.3. Kapacitní měření tlaku

Jedná se rovněž o měření využívající pro převod tlaku na elektrickou veličinu deformace tuhého tělesa. Toto těleso představuje membrána z vodivého materiálu, jenž tvoří elektrodu kondenzátoru. Ve vnitřním prostoru kapacitního převodníku je naproti ní uložena druhá elektroda. Vnitřní prostor kapacitního převodníku bývá většinou při výrobě odsátý do velmi nízkého tlaku, což slouží jako trvalá reference převodníku. Tyto převodníky tak měří tlak ve velmi velkém rozsahu a navíc díky vnitřní referenci měří tlak absolutní.



Obr. 6. princip kapacitního převodníku

Jiné v praxi hojně využívané uspořádání kapacitních převodníků je tzv. diferenční uspořádání, ve kterém je membrána z vodivého materiálu umístěna mezi dvěma dalšími s nimiž tvoří dva samostatné kondenzátory. Tyto kondenzátory pak tvoří tzv. diferenční pár a jejich vzájemné uspořádání tak zvyšuje citlivost snímače. Pro určení absolutního tlaku pak musíme znát jeden z tlaků a brát ho jako referenci.

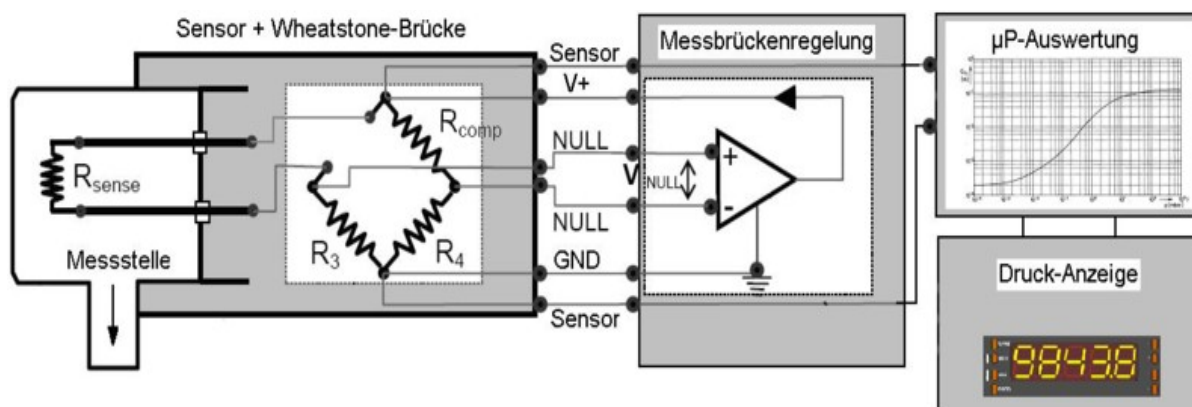


Obr. 7. Diferenční snímač s kapacitním převodem[22]

1.4.4. Snímače vakua

Vakuum je v oboru měření tlaku velmi specifickou oblastí. Je zde totiž nutné brát plyn jehož tlak měříme ne jako souvislou hmotu, ale jako soubor jednotlivých částic. Pro měření vakua v technické praxi se nejvíce používají dva typy snímačů.

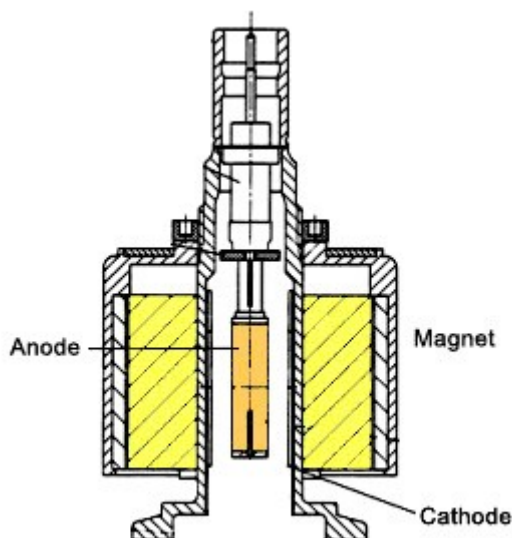
Prvním typem je tepelný snímač nazvaný **Piraniho vakuoměr**. Tento snímač funguje na principu odvodu tepla ze žhaveného drátku vlastními částicemi měřeného prostředí, které s drátkem interagují. Celé to funguje tak, že proudovým zdrojem je vybuzen proud, který protéká tenkým drátkem umístěným v měřeném vakuu. Tento proud zahřívá drátek stále stejnou energií. Při interakci plynu o určitém tlaku s drátkem dopadá na drátek počet částic plynu závislý právě na tlaku plynu. Tyto částice z drátku odebírají přebytečné teplo a teplota drátku se tak ustálí na určité hodnotě, již odpovídá i odpor drátku. Pokud budeme snižovat tlak prostředí budou částice plynu z drátku odebírat méně tepla a jeho odpor poroste. Jednoduchým měřením napětí na drátku tak můžeme zjistit hodnotu vakua. Tento vakuoměr má však velmi malý rozsah, který se pohybuje mezi stovkami až desetinami Pa. V praxi se proto používá v kombinaci s dalším typem snímače určeného do vysokého vakua.



Obr. 8. Piraniho vakuoměr[23]

Vakuoměrem pro vysoká vakua je především **Peningův ionizační vakuoměr**. Jde o elektroodový systém s vysokým napětím mezi anodou a katodou, umístěný v magnetickém poli permanentního magnetu. Princip měření u tohoto vakuoměru spočívá v měření vodivosti plasmy zažehnuté mezi anodou a katodou, na kterou má přímý vliv koncentrace částic v měřeném prostředí. Jak se se snižujícím tlakem snižuje i koncentrace, snižuje se i proud protékající plasmou až do jejího zániku, kdy přestane mezi anodou a katodou hořet doutnavý výboj. Magnetické pole u tohoto vakuoměru má funkci zvýšení rozsahu do velmi nízkých tlaků. Kdy na nabité částice plasmatu působí Lorentzova síla kolmá na směr vektoru rychlosti částice. Tato částice se začne pohybovat po spirále

a mnohonásobně se zvětší její dráha, kterou urazí mezi elektrodami. Tímto způsobem se výrazně zvýší pravděpodobnost ionizace další částice jenž se může podílet na vedení proudu.



Obr. 9. Peningův vakuoměr [24]

1.5. Možnosti inteligentních snímačů tlaku

Pojem inteligentní snímač poprvé definovali v roce 1978 Beckerbridge a Hudson následujícím způsobem:

Inteligentní snímač obsahuje funkce pro zpracování měřených dat, automatickou korekci měřených dat, dokáže automaticky detekovat a eliminovat abnormální a nesprávné hodnoty. Obsahuje také sadu algoritmů, které umožní reagovat na změnu vnějších podmínek.

Dnes patří mezi základní požadavky kladené na inteligentní snímače zejména programovatelné zesílení, linearizace, filtrace, a normalizace měřeného signálu, možnost automatické korekce vlivu parazitních veličin, pokročilé metody potlačení šumu a verifikace platnosti naměřených dat, autokalibrace a autodiagnostika, statistické funkce, hlídání mezí a v neposlední řadě možnost přímého zapojení snímače do distribuovaných systémů pomocí vhodné digitální komunikační sběrnice.[16]

S rozvojem planárních technologií a integrovaných obvodů se objevila nova kategorie inteligentních snímačů tzv. MEMS (micro-electro-mechanical-systems). Jsou to inteligentní snímače, které jsou vytvořeny planárními technologiemi na jednom substrátu a to jak část převodníku fyzikální veličiny na elektrickou tak i řídicí elektronické obvody a komunikační rozhraní.

1.6. Používaná komunikační rozhraní

Jednou z nejdůležitějších vlastností inteligentních snímačů je schopnost oboustranné komunikace s nadřazeným systémem. Současně to ale představuje i jeden z největších problémů při reálném nasazení inteligentních snímačů, protože v praxi se používá velké množství nejrozličnějších průmyslových sběrnic. Pro výrobce inteligentních snímačů je obtížné pokrýt kompletní portfolio sběrnic a zaměřují se tak především na nejrozšířenější a nejpoužívanější standardy využívané v cílových odvětvích, pro které je snímač určen. Pro automobilový průmysl jsou to nejčastěji standardy J-1850, J-1939 CAN a Flexray. V oblasti výrobních technologií a výrobních linek jsou to standard HART, standard IO-link, ze sériových rozhraní potom I2C, CAN, Profibus PA, Foundation Fieldbus, DeviceNet, SDS nebo dnes už běžně využívané síťové připojení LAN. Další standardy jsou využívány pro automatizaci budov kde je potřebný spolehlivý a rychlý transport dat na dlouhou vzdálenost, v tomto odvětví se také masivně využívají technologie LAN a WirelessLAN či technologie využívající jako fyzickou vrstvu elektrických rozvodů.

2. Komunikační protokol HART

HART, plným názvem HART[®] Field Communication Protocol (HART - Highway Addressable Remote Transducer) je komunikační protokol, který umožňuje digitálně přenášet data po analogové proudové smyčce 4 až 20 mA.

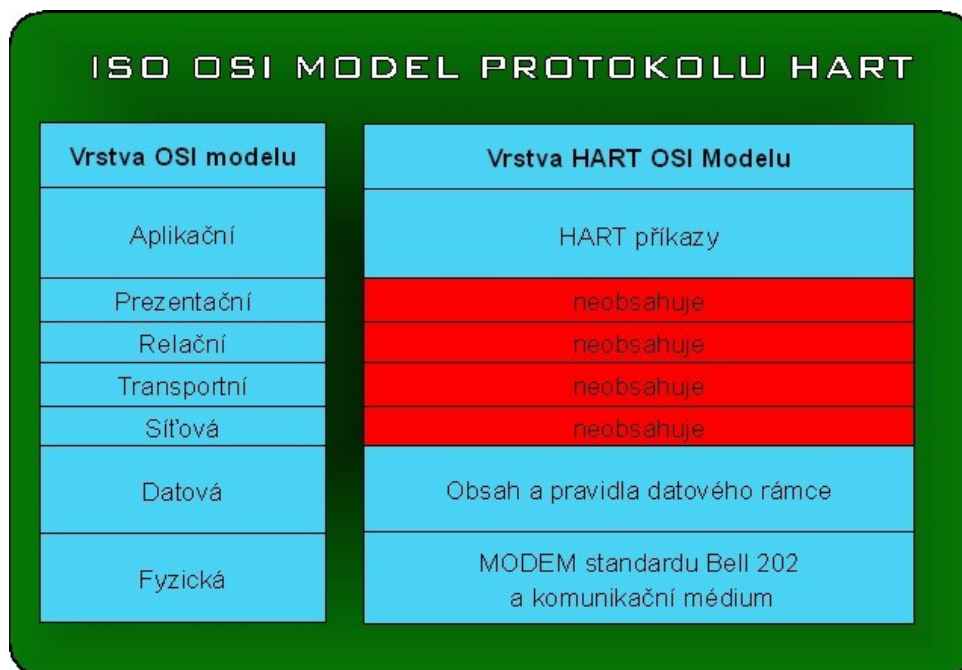
O protokolu HART uvažují především ti uživatelé, kteří hledají jednoduchý a spolehlivý způsob, jak digitálně a na dálku seřizovat snímače a akční členy. Ovšem HART v současné době umožňuje mnohem více než jen to. Významní dodavatelé automatizační techniky nabízejí řídicí systémy, distribuované jednotky I/O a počítačové řídicí aplikace, které využívají protokol HART k diagnostice provozních přístrojů a celého výrobního procesu.[\[2\]](#)

2.1. Obecná specifikace protokolu HART

Protokol HART je určen pro obousměrnou číslicovou komunikaci mezi zařízením (většinou se jedná o inteligentní snímače) a nadřazeným systémem pro kontrolu či monitorování. Nadřazeným systémem může být například obecně počítač nebo ruční terminál, nebo řídicí systém mající na starosti chod celé továrny. Protože většina snímačů dnes má výstup ve formě dvou vodičové proudové smyčky 4-20mA, je tento protokol navržen tak, aby pracoval současně při tomto analogovém signálu a aby tak nebylo potřeba vytvářet další komunikační trasu. Po původních vodičích proudové smyčky tak lze vést jak původní analogový, tak i číslicový signál. Tímto způsobem je tedy možné odesílat měřenou hodnotu v analogové i digitální formě a vyloučit tak chybu vzniklou převodem z analogového signálu na číslicový a zpět. Můžeme si také po stávající

lince nechat zasílat informace o jiných veličinách, které je snímač schopen změřit. Pro případ snímače tlaku to nemusí být jenom samotný tlak, ale například i teplota. V současnosti se protokol hojně využívá zejména pro inteligentní snímače. [3]

Podle ISO OSI modelu viz. Obr. 10. má standart HART pouze tři vrstvy fyzickou, datovou a aplikační.

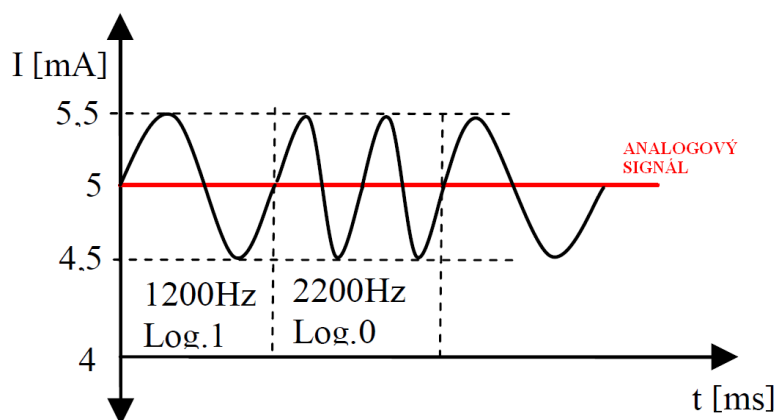


Obr. 10. ISO OSI model standardu HART

2.2. Fyzická vrstva standardu HART

2.2.1. Přenos signálů

Přenos číslicového signálu po analogové lince je založen na superpozici frekvenčně klíčených signálů, tzv. FSK (Frequency Shift Keying) na původní analogový signál 4-20mA. Jinými slovy pracuje na základě přepínání frekvence a princip je založen na standardu Bell 202. Logické hodnoty jsou následující. Logické 1(H) odpovídá signál o frekvenci 1200 Hz a logické 0(L) odpovídá signál o frekvenci 2200 Hz. Superponovaný signál na analogovém signálu dosahuje hodnot amplitudy přibližně 0,5 mA, ale důležité je, že střední hodnota signálu je vždy nulová a tím pádem nijak neovlivňuje hodnotu proudové smyčky.[3]



Obr. 11. Ukázka superpozice frekvenčně klíčovaného signálu a proudové smyčky[3]

Samotný číslicový přenos je organizován systémem Master-Slave. V tomto systému může Slave zařízení komunikovat pouze tehdy, je-li vyzváno Master zařízením. V celém zapojení se mohou vyskytovat dvě zařízení Master. Jeden z nich je obecně řídicí systém nebo počítač (tzv. Primary Master), a lze použít ještě druhotné zařízení pro komunikaci, jako jsou například ruční terminály, nebo laptopy (tzv. Secondary Master). Ruční terminály se často používají pro seřizování snímačů a kontrolu komunikace systému. Všechna tato zařízení obsahují Hart modem.[3]

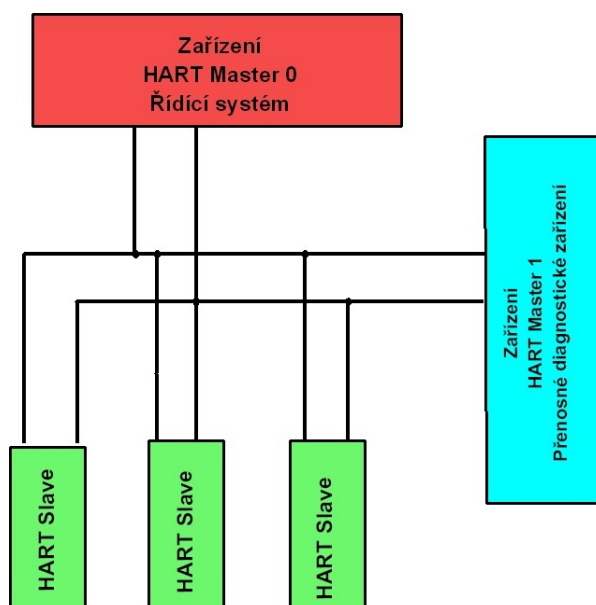
2.2.2. Elektrické propojení a topologie

Pro propojení jednotlivých zařízení je používán stíněný nízkokapacitní kabel s jedním nebo dvěma kroucenými páry vodičů podle toho, jestliže slave zařízení pro svůj provoz potřebuje vlastní napájecí zdroj.

Vodiče musí mít průměr 0,51 mm při komunikaci po vodiči o délce do 1500 metrů a 0,81mm pro větší vzdálenosti. Pro prevenci rušení by měly být proudová smyčka a stínění kabelu uzemněny pouze na jednom místě nejčastěji v rámci připojeného zařízení typu master.

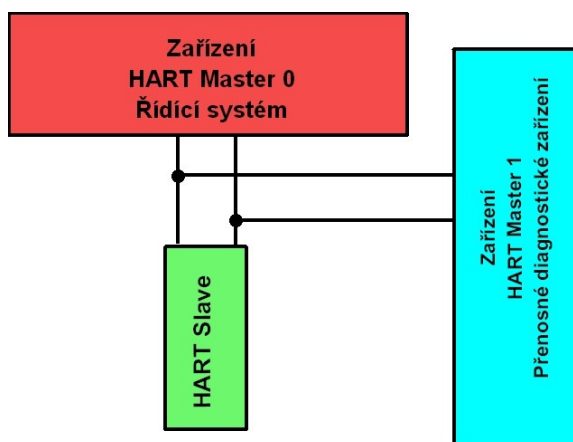
Pro komunikaci lze použít dva typy topologií :

Sběrníková topologie se vyznačuje tím že všechna Slave zařízení jsou připojena paralelně na jedno vedení (proudovou smyčku) a každé zařízení má svou specifickou adresu, pomocí které jej může Master zařízení vyzvat ke komunikaci. Sběrníkové zapojení má ale nevýhodu, že zařízení mohou komunikovat pouze číslicově a hodnota proudu ve smyčce je udržována na minimální konstantní hodnotě (4 mA) a jednotlivá zařízení jsou postupně vyzývána ke komunikaci. Toto uspořádání je známo jako „Multidrop“.



Obr. 12. Sběrníková topologie HART standardu

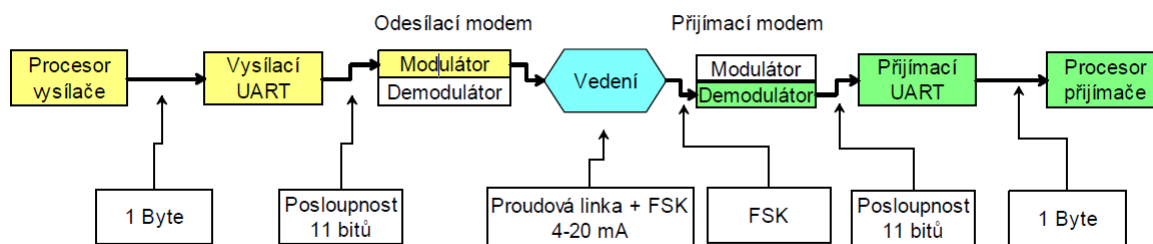
Hvězdicová topologie je zapojení všech jednotlivých Slave zařízení samostatným vedením (proudovou smyčkou) vždy pouze k jednomu zařízení typu master které poté komunikuje s nadřazeným systémem jiným způsobem. Při této topologii lze použít tzv. „Burst mód“ a urychlit tak komunikaci.



Obr. 13. Hvězdicová topologie HART standardu

2.2.3. Transportní kanál přenosu dat:

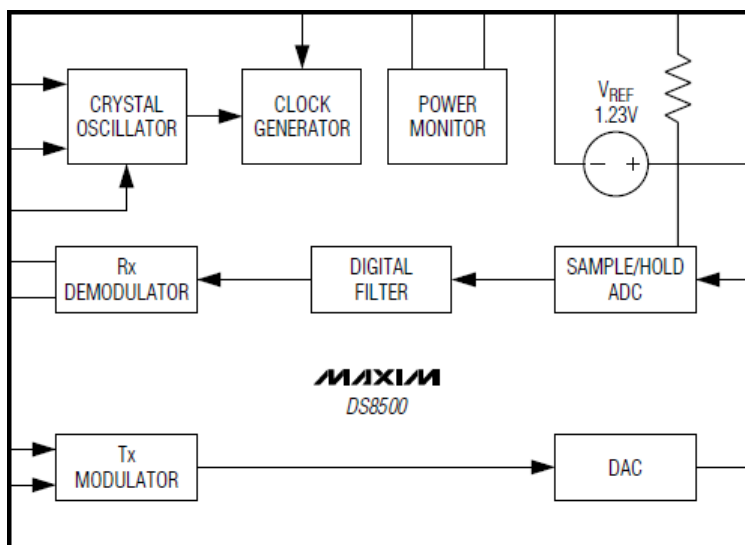
Při přenosu dat přes kanál standardu HART dojde nejprve k zapsání bytu dat do registru UART rozhraní ve vysílacím procesoru. Přes UART rozhraní se přenesou do modemu standardu Bell 202, kde jsou data převedena na frekvenčně klíčovaný signál a superponována do proudové smyčky vedení. Přenesená data jsou poté demodulována a poslána pomocí UART rozhraní do procesoru přijímače kde dokončený přenos celého bytu vyvolá přerušení.



Obr. 14. Transportní kanál standardu HART[3]

2.2.4. Hart modem

Je zařízení, jež se stará o frekvenční modulaci zasílaných dat rozhraním UART a o demulaci přijímaných dat pro rozhraní UART a je popsáno standardem Bell 202. Klíčování signálu je inicializováno přepínáním dvou sinových oscilátorů o frekvencích 1200 a 2200 Hz podle toho, jestliže jde o hodnotu log. "1" nebo "0". O přidání signálu do proudové smyčky se stará externí směšovač, který není součástí modemu. Při demodulaci se využívá velmi rychlého AD převodníku a dvou číslicových frekvenčních filtrů typu pásmová propust s velmi vysokou strmostí. [6]



Obr. 15. Vnitřní zapojení HART modemu[6]

2.3. Datová vrstva standardu HART

Protokol HART odesílá a přijímá data ve formě rámců. Každý rámec se skládá ze sedmi částí, přičemž každá část rámce se skládá z několika bytů. Ke každému bytu jsou jako u většiny ostatních sériových protokolů přidávány k osmi bitům nosícím informaci ještě paritní bit umožňující kontrolu přenesených dat a start, stop bity. Tyto bity jsou přiřazeny do rámce automaticky rozhraním UART, do jehož zásobníku je zapsán byte vysílaný nadřazeným systémem Master.

Posloupnost 11 bitů je dále přenesena pomocí fyzické vrstvy do zásobníku UART rozhraní SLAVE zařízení kde je zkontrolována lichá parita a hodnota je kopírována do vybraného registru CPU jednotky SLAVE zařízení.

bit	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Startovní bit	Data [7. .0]								Ukončující bit	

Obr. 16. Struktura rámce jednoho přeneseného bytu rozhraním UART

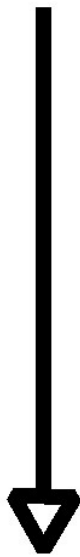
Protokol HART se skládá ze sedmi částí a jedné části zvané hlavička, která slouží k synchronizaci modemu a obsahuje 3 nebo více hodnot 0xff .

Hlavička	Oddělovač	Adresa	Rozšiřující byty	Příkaz	Počet bytů	Data	Paritní byte
3x 0xff	1 byte	dva typy stanovuje oddělovač	různé počet stanovuje oddělovač	Příkaz	1byte	různé stanovuje počet bytů	Paritní byte

Obr. 17. Struktura rámce protokolu HART

Oddělovač

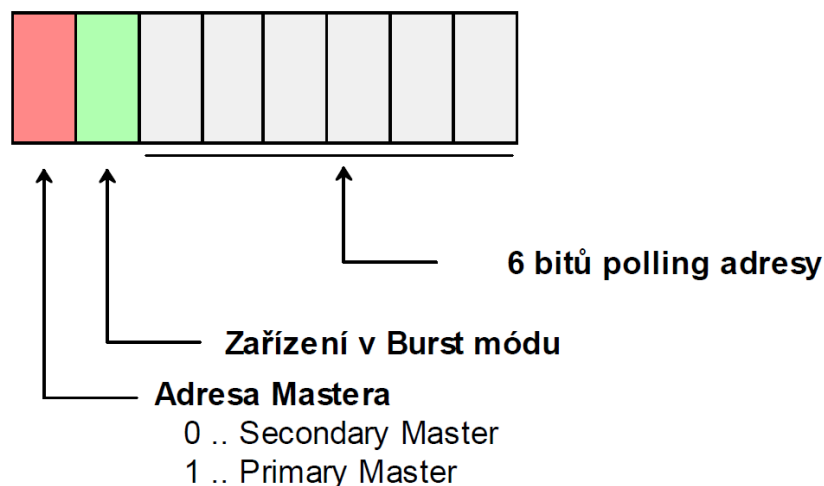
Indikuje začátek rámce a ukazuje na pozici, kde končí hlavička rámce a začínají přenášená data. Tento poslední byte hlavičky obsahuje údaj o pořadí posledního kontrolního bytu podélné parity. Podle hodnoty nejvyššího bitu v oddělovači[7] poznáme, jestli následuje krátká jednobytová nebo dlouhá 5 bytová adresa. Další dva bity[6.5] v oddělovači nesou hodnotu, zda budou následovat byty části rozšiřující byty. Bity[4,3] obsahují údaje o typu fyzické vrstvy a pro asynchronní FSK platí hodnota 0b00 a bity[2.1.0] označují mód komunikace.

Pořadí přenosu	Pozice bitu	Význam jednotlivých bitů
	7	Typ adresy: dlouhá = 0bX krátká = 0bX
	6	Počet rozšiřujících bytů
	5	
	4	ID Fyzické vrstvy: Asynchronní 0b00 Synchronní 0b01
	3	
	2	Mód komunikace: Slave -> master 0b110 Master -> slave 0b010 Burst režim 0b001
	1	
	0	

Obr. 18. Struktura dat v bytu oddělovače

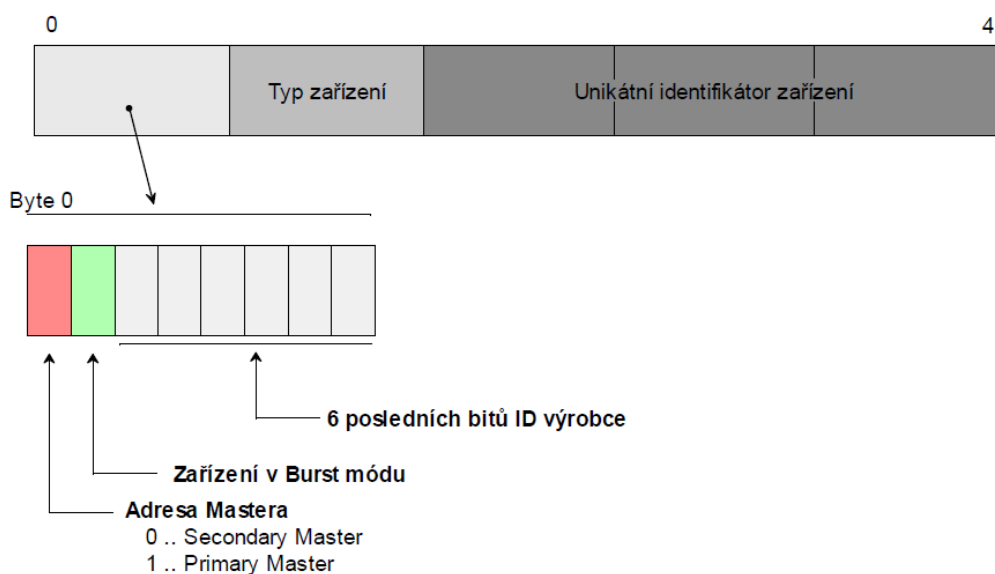
Adresa

Krátká adresa – je o délce jednoho bytu obsahující informace o tom které master zařízení uvádí komunikaci, jestli se jedná o „Burst rámeček“ a 6 bitový identifikátor slave zařízení, který je udán výrobcem a určuje typ zařízení. Tato adresa se užívá pouze při komunikaci v sítíovém režimu.



Obr. 19. Ukázka pozic v krátké adrese[3]

Dlouhá adresa – je o délce 5 bytů obsahuje rovněž informaci o tom který typ Master zařízení inicializuje komunikaci, informaci o „Burst“ typu rámce, ID výrobce, informaci o typu zařízení a navíc 3 byty s tzv. Unikátním identifikátorem využívaným pro adresování stejných typů slave zařízení se stejným identifikátorem výrobce. V síťovém režimu lze rámeček dat adresovat více zařízením se stejným ID výrobce najednou ale pouze tehdy jde-li o zprávu na kterou bude reagovat zpětnou komunikací pouze jedno zařízení. Jedná se o tzv. „Broadcast“ adresu obsahující pouze nuly a využívá se pro servisní účely.



Rozšiřující byty

pole je 0-3 byty dlouhé a jeho délka je zadána v oddělovači, tato část se obvykle z rámce vynechává.

Příkaz

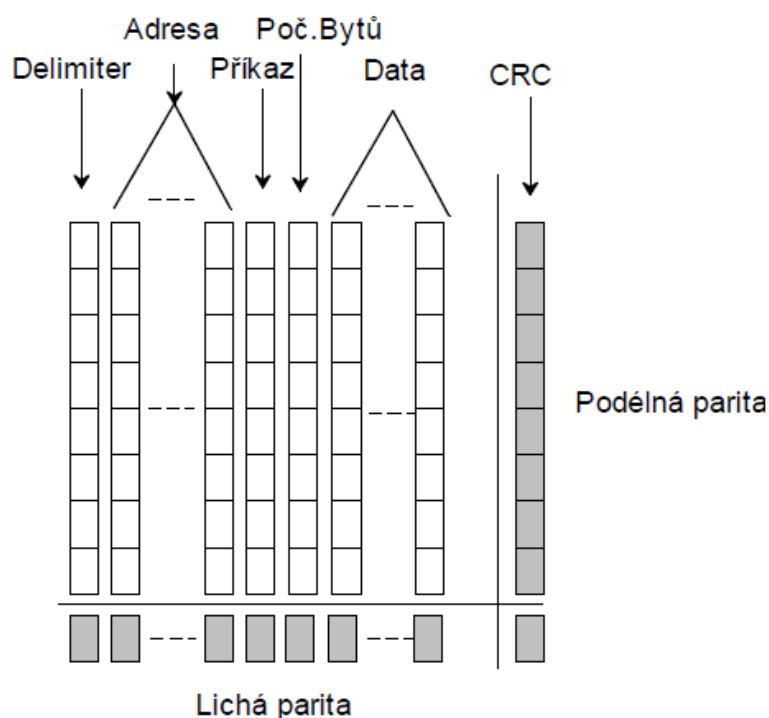
je jeden byte jehož hodnota označuje příkaz, který se má vykonávat. Protokol HART má několik typů příkazů. Příkazy 0-22 jsou standardně implementovány ve všech HART zařízeních 32-121 jsou obecné a nemusí být implementovány a příkazy 128-253 jsou příkazy uživatelské. [3]

Počet bytů

v této části datového rámce je pouze jeden byte. Hodnota bytu udává počet datových bytů které budou následovat tak že je to počet bajtů, za který přijde byte kontrolní podélné parity.

CRC – byte kontrolní podélné parity

Kontrolní součet obsahuje výsledek funkce X-OR všech bytů od oddělovače až po poslední datový byte. Tuto kontrolu nazýváme „podélná parita“. Kromě této kontroly parity obsahuje HART protokol ještě jednu kontrolu liché parity a to při příjmu / vysílání jednotlivých bytů.[3]



Obr. 21. Ukázka parit využívaných při kontrole komunikace[3]

2.4. Aplikační vrstva protokolu HART

Aplikační vrstvu zajišťuje master zařízení pomocí programu voláním určitých příkazů popsanych v předchozí části, jejichž seznam je z části tvořen obecnými příkazy, které jsou společné u všech zařízení používající standard HART. Zbytek příkazů je různý pro každé zařízení a bývá udán výrobcem v katalogovém listu.[3]

3. Komunikační protokol IO-link:

3.1. Obecná specifikace standardu IO-link

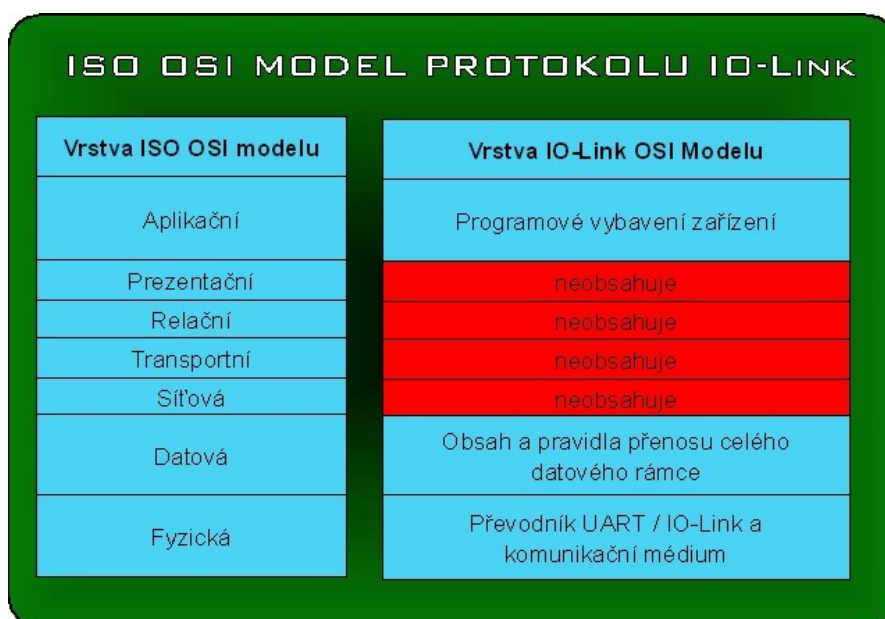
IO-Link je speciální digitální nesíťová komunikace pro snadné připojení a komunikaci různých snímačů a případně i akčních členů po sériové sběrnici. Hlavními výhodami je následně snadné napojení na průmyslové sběrnice, rychlý automatický přenos naměřených hodnot, dálkové nastavení i s automatickou konfigurací snímače a podrobná kontrola funkce snímače. Velkou výhodou je zpětná kompatibilita s klasickým spínaným výstupem.

IO-Link je docela nová digitální komunikace typu bod-bod (point-to-point) zaměřená hlavně na současné inteligentní senzory a akční členy pro průmyslovou automatizaci. Vznikla jako digitální náhrada dosud převažující analogových výstupů 0 až 10 V, 4 až 20 mA nebo jako náhrada spínaných výstupů.[4]

Běžně se senzory s těmito výstupy připojují do průmyslových sběrnic řídicích systémů prostřednictvím vstupně-výstupních modulů. Tuto funkci v případě IO-Link komunikace přebírá IO-Link Master, který mapuje připojená IO-Link podřízená zařízení a funguje jako komunikační brána k nadřazené průmyslové sběrnici. Pomocí IO-Link lze přenášet řídicí nebo diagnostická data do senzoru a naopak zpět získávat naměřené hodnoty. Tím lze senzor vzdáleně plně ovládat, včetně změny jeho nastavení či zjišťování jeho stavu. Přestože je senzor vybavený IO-link, je také stále zpětně kompatibilní s tradičními spínanými signály dle standardu IEC 61131-2.[4]

Podle ISO OSI modelu komunikace prostřednictvím IO-Link rozhraní má pouze 3 vrstvy. Viz. Obr. 22.

- vrstvu fyzickou zprostředkující přenos signálu mezi zařízeními.
- vrstvu datovou, která určuje pravidla přenášených dat a jejich řazení do datových rámců a
- vrstvu aplikační, jež je tvořena programovým vybavením zařízení.



Obr. 22. ISO OSI model IO-Link standardu[5]

3.2. Fyzická vrstva standardu IO-link

3.2.1. Topologie a elektrické propojení:

Základní komunikační strukturou je hvězda, v jejímž středu je IO-Link Master (nadřazené zařízení), který řídí a navazuje komunikaci se Slave (podřazené zařízení) jednotkami stylem bod-bod. Těmto jednotkám buďto data předává, nebo je o data žádá. Fyzicky tak Master musí mít tolik připojovacích portů, kolik jednotek (senzorů) chceme připojit. Tím odpadá potřeba adresování jednotek na úrovni samotné IO-Link komunikace.[4]



Obr. 23. Topologie IO-link rozhraní[4]

Způsob jakým fyzicky Master a Slave jednotka přenáší data, představuje známý 8bitový asynchronní sériový přenos dat standardu UART. Proto je také délka 2 nebo 3 vodičového komunikačního kabelu omezena na 20 metrů a přenosová rychlost může být od 4,8 kbps, přes 38,4 kbps, až po 230,4 kbps.

Kódování bitového sériového přenosu je metodou NRZ (Non Return to Zero), kde stav log. 1 odpovídá napětí 24 V mezi vodiči L+ a C/Q. Stav log. 0 odpovídá napětí 0 V mezi vodiči L+ a C/Q. Díky tomuto kódování bitů lze v IO-Link komunikaci využít již zmíněné možnosti 2 či 3 vodičového rozhraní (propojení), které se označuje jako PHY1, resp. PHY 2.[4]



Obr. 24. Možné provedení IO-Link rozhraní[5]

V případě dvouvodičového PHY1 se komunikace i napájení Slave jednotky provádí prostřednictvím již zmíněných dvou vodičů L+ a C/Q díky za pomoci časového multiplexu. Z tohoto důvodu je nutné zachovat minimální přenosový čas TCycle a proto je minimální přenosová rychlost omezena na 230,4 kb/s. V případě PHY2 se pro přenos bitů již využívá jen speciálního vodiče C/Q a pro napájení nepřetržitě L+ a L-. Někdy se ještě můžeme setkat u akčních členů i s 5pinovým rozhraním, kde další pár vodičů slouží pro izolované napájení akčního členu.

Pro fyzické připojovací rozhraní IO-Link standard přesně definuje konektory, které lze pro propojení využít. Těmi jsou většinou prachotěsné a vibračním odolné průmyslové konektory M5, M8 a M12, přičemž na straně Master jednotky je definován typ samice a na straně Slave jednotky typ samec. [4]

3.2.2. Komunikační módy

Slave zařízení vybavené pro IO-Link komunikací podporují použití dvou režimů komunikace tzv. standardní IO režim a IO-Link režim.

Standardní IO režim (SIO) - představuje klasický provozní režim se spínáním výstupním signálem ze Slave jednotky, jaké používá drtivá většina limitních snímačů.

IO-Link režim – tento režim představuje standardní digitální komunikaci prostřednictvím UART rozhraní o třech různých rychlostech 4,8 kbps, 38,4 kbps nebo 230,4 kbps.

3.3. Datová vrstva standardu IO-link

Lze říci že datová linková vrstva je hlavní částí IO-Link komunikace, protože reguluje přenos dat prostřednictvím IO-Link rozhraní a slouží jako provozní rozhraní mezi softwarovou aplikační vrstvou a hardwarovou fyzickou vrstvou.

Uživatelská data (byty dat) zasílané z aplikace přes aplikační hladinu jsou v datové linkové vrstvě organizovány do jednotlivých telegramů pro vyslání fyzickou vrstvou, přičemž význam přenášených bajtů je definován typem rámce a datalink příkazem, který je do něj datovou linkovou vrstvou přidán.

V případě IO-Link komunikace představuje datový rámec přímý přenos UART rámců prostřednictvím IO-Link rozhraní, jak ve směru Master – Slave, tak ve směru Slave – Master. Skupina telegramů, které realizují určitou komunikaci mezi master a slave jednotkou tvoří rámec dat. Typy rámců jsou pevně definované standardem a definují určitou danou kombinaci telegramů od Master a Slave jednotky podle toho, jaká data jsou v obou směrech přenášena (procesní data vs. data na vyžádání).

Každý rámec v sobě obsahuje informaci o tzv. datovém kanále IO-Link komunikace, přičemž i každý typ rámce představuje rozdílný typ datového kanálu a tedy přenáší i odlišná data, informace a požadavky. Jejich specifikace splňuje různorodé požadavky senzorů nebo akčních členů vzhledem k šířce a množství procesních dat a aktuálním provozním a přenosovým podmínkám.[4]

3.3.1. Datové kanály:

Procesní data (Process data) jsou informace přenášena s vysokou prioritou a dle pevného rozvrhu. Přenos začíná automaticky po startovací sekvenci bez potřeby žádosti aplikace. Procesní data zahrnují měřené hodnoty a řídicí proměnné. Cyklus procesních dat definuje časový harmonogram zasílání procesních dat od každé stanice. V závislosti na množství dat odesílaných stanicí může jeden přenos procesních dat obsahovat jeden nebo více cyklů. [4]

Data na vyžádání (On-request data) jsou informace, které jsou vysílány necyklicky na žádost aplikace, přesněji řečeno na žádost řídicí Master jednotky nebo nadřazeného systému prostřednictvím této jednotky. Pod tento typ spadají parametry Slave aplikace (například rozsah měřené veličiny) a data týkající se různých událostí. [4]

Přímé parametry / diagnostická data (Direct parameters / Diagnosis data) jsou speciální data vysílána na žádost, která jsou přenášena bez potvrzení ve vyhrazeném datovém kanále. [4]

Události (Events) / Service PDU jsou informace na vyžádání, jejichž přenos je iniciován nastavením příznaku události v CHK/STAT bytu Slave jednotky nacházející se ve vyhrazeném datovém kanále. Události mohou být inicializovány samotnou aplikací nebo komunikačním

protokolem. Přenos "Service PDU" realizuje přenos velkého množství dat s požadavkem na jejich potvrzení. Využívá se například pro výměnu aplikačních datových objektů.[4]



Obr. 25. Ukázka jednoho přeneseného datového rámce jednoho cyklu[5]

Ve specifikaci IO-Link komunikace jsou výše uvedené druhy dat (procesní data, data parametrů, data na vyžádání a zprávy o událostech) zprostředkovány prostřednictvím již zmíněných datových kanálů. Ty jsou vzájemně nezávislé a v každém rámci je přesně definován typ přenášených dat, tedy prakticky říkají Master i Slave jednotkám, jaká jsou to data a jak se s nimi má zacházet (kam se mají ukládat, jak zpracovat apod.). Datové kanály tak realizují cesty, které přesně směřují data do správného místa uložení nebo zpracování. Informace o datovém kanále tvoří část tzv. DL příkazu (data-linkový příkaz) jenž reprezentuje první byte samotné komunikace. Ten tvoří část řídicího bytu a existuje 8 různých příkazů. Ty se využívají k zajištění přístupu ke čtení nebo zápisu do 4 výše definovaných datových kanálů.[5]

3.3.2. Posloupnost vysílaných dat a cyklus přenosu:

Komunikaci zahajuje vždy jednotka MASTER která vždy vysílá byte příkazu (CMD) a byte s identifikací dat (CKT) a poté následují přenášená procesní či žádaná data a nakonec následuje kontrolní rámec (CKS).

Cyklus přenosu je posloupnost různých rámců uváděných různými příkazy a přenáší se v tomto cyklu pouze procesní a žádaná data. Je pevně naprogramovaný a probíhá v nekonečné smyčce. Je přerušen pouze tehdy, když nastane potřeba přenosu dat v kanálu s větší prioritou. Toto mohou být například chybová hlášení a následná diagnostická data.

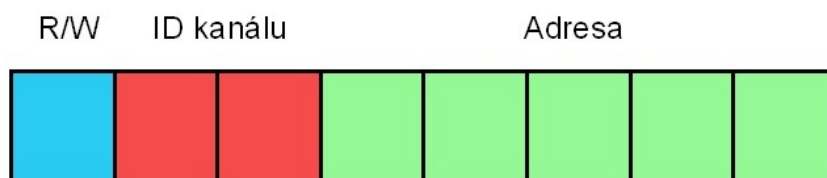
3.3.3. Struktura jednotlivých typů provozních bytů v datovém rámci jednoho cyklu

Struktura bytu CMD:

První bit data-linkového příkazu vysílaného MASTER zařízením obsahuje informaci o tom zda-li se mají data číst (log „0“) či zapisovat (log „1“), další 2 bity slouží k identifikaci dat a posledních 5 bitů slouží k označení pozice dat v datovém kanálu během jednoho cyklu. [5]

Tabulka významu hodnot ID kanálu:

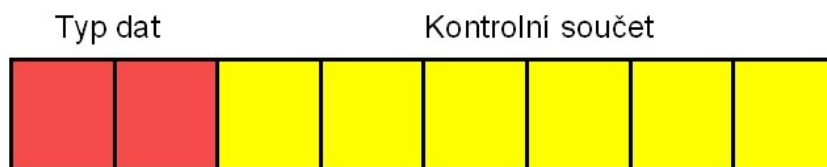
0b00	Procesní data
0b01	Data na vyžádání
0b10	Diagnostická data
0b11	Servisní data/data událostí



Obr. 26. Struktura bytu CMD [5]

Struktura bytu CKT:

V tomto bytu je zařízením MASTER v prvních dvou bitech definováno jak jsou data v rámci strukturována a závisí na konfiguraci a na řízení směru procesních dat. V následujících šesti bitech je uložen výsledek výpočtu komprimované podélné parity viz.3.3.4 následujících dat vysílaných ve směru k SLAVE zařízení. [5]

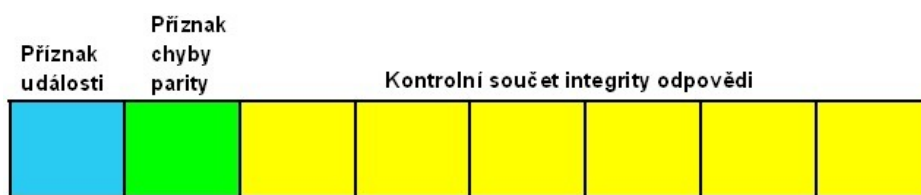


Obr. 27. Struktura bytu CKT [5]

Typ dat je definován standardem a určuje šířku přenášeného rámce v jednom cyklu. Například pokud je hodnota 0b00, jde o nejkratší rámec kdy se přenáší jen jeden byte buď od, Master zařízení nebo do MASTER zařízení. Toto je inicializováno prvním bitem přenosu v CMD bytu. Typy jednotlivých rámců jsou popsány v publikaci [5] od stránky 181.

Struktura bytu CKS:

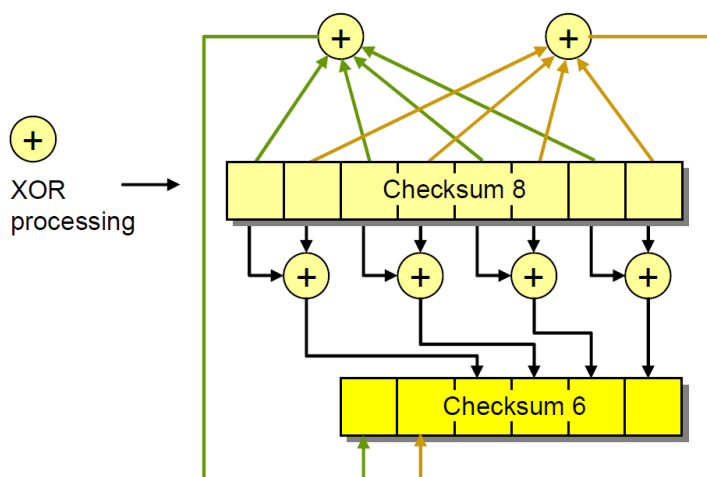
Jedná se o byte rámce dat vysílaného zařízením SLAVE. První bit reprezentuje příznak události pokud je v něm přijata hodnota log „0”. To realizuje podnět pro zařízením master aby byly informace o události přečteny v dalším cyklu přes diagnostický kanál. Zařízení může podávat zprávy jako diagnostické informace, selhání, a chybová hlášení pomocí odpovědi na událost. Pomocí dalšího bitu, který znamená příznak chyby parity zařízením SLAVE. Ten indikuje, že došlo k chybě při kontrole přijatých dat a hodnoty kontrolního součtu a je rovněž indikován hodnotou log „1”. V posledních 6 ti bitech je zapsána hodnota komprimovaného kontrolního součtu podélné parity celého rámce dat vysílaného K zařízením typu MASTER. [5]



Obr. 28. Struktura bytu CKS [5]

3.3.4. Kontrola podélné parity a její komprese:

V protokolu IO-Link je využita kompresní paritní kontrola. První krok výpočtu takovéto parity je standardní výpočet podélné parity jako v případě standardu HART viz Obr. 21. ale poté se 8bitový výsledek zredukuje na 6 bitů. Algoritmus komprese je naznačen na Obr. 29. [5]



Obr. 29. Komprese podélné parity [5]

Výpočet komprimované parity z podélné parity:

$$D5_K = D7_P \oplus D5_P \oplus D3_P \oplus D1_P$$

$$D4_K = D6_P \oplus D4_P \oplus D2_P \oplus D0_P$$

$$D3_K = D7_P \oplus D6_P$$

$$D2_K = D5_P \oplus D4_P$$

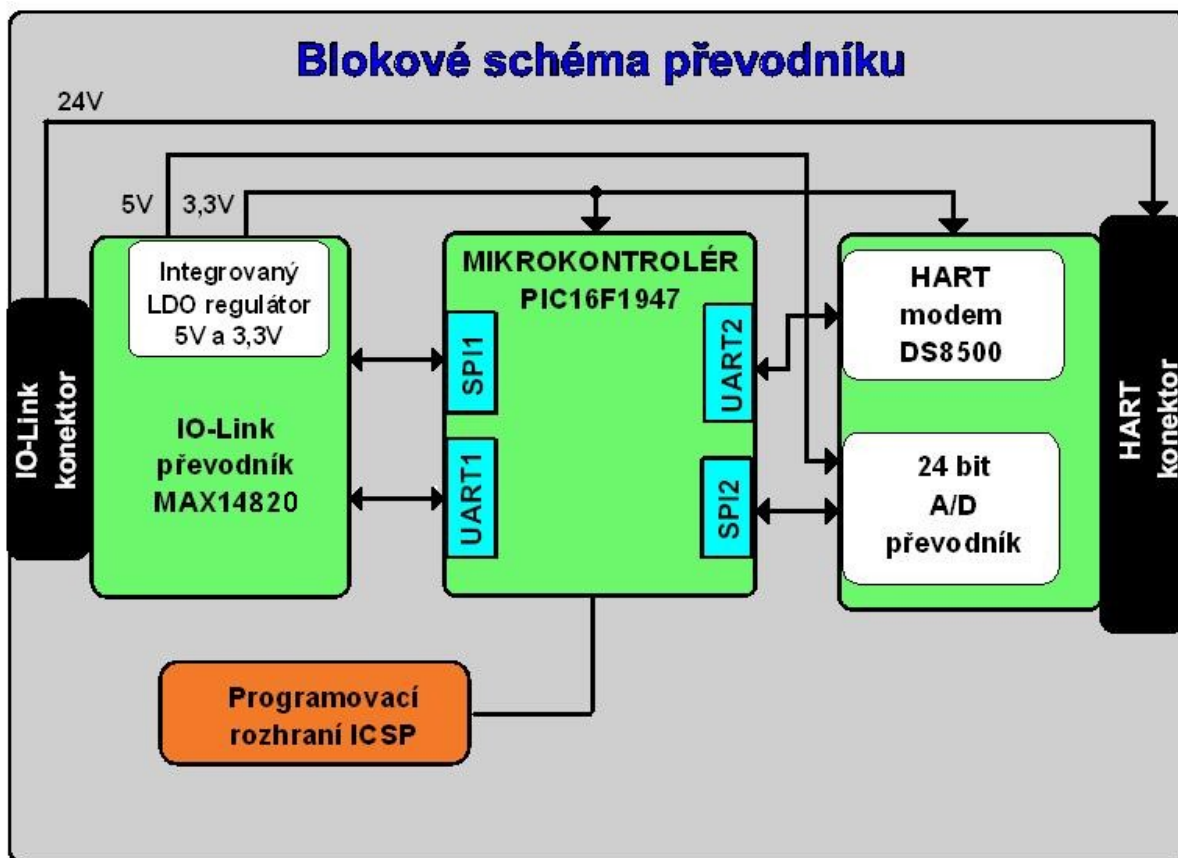
$$D1_K = D3_P \oplus D2_P$$

$$D0_K = D1_P \oplus D0_P$$

4. Převodník z komunikačního protokolu HART na IO-link protokol

Pro převod obou standardů použijeme mikrokontrolér se dvěma rozhraními standardu UART, který bude v nekonečné smyčce čekat na přerušení od IO-link linkového převodníku s následným přenosem dat přes UART rozhraní. Po přijetí prvních dvou bytů CMD a CKT výpočetní jádro ve volném strojovém čase určí délku přenášených dat. Po odposlechu celého rámce dat z IO-link rozhraní výpočetní jádro mikrokontroléru porovná komprimovanou kontrolní paritu z vlastního výpočtu s hodnotou zachycenou v druhém bytu přenosu CKT. Poté převede původní rámec do HART standardu a naváže komunikaci se zařízením připojeným přes HART rozhraní. V dalším kroku se bude systém v časově omezené smyčce tázat na příznak příchozí komunikace v registru UART rozhraní na, které bude připojen HART modem. Po obdržení odpovědi výpočetní jádro rovněž zkontroluje podélnou paritu, vypočítá komprimovanou paritu a vyšle příslušná data přes UART rozhraní připojeného k IO-linkovému převodníku. Jestliže nastane přetečení časovače a HART modem nenaváže komunikaci, pošle systém prázdná data až na to, že v posledním bytu nastaví příznak chybové události.

Rovněž nastaví příslušný optický signál v podobě rozsvícení červené LED Pro převod napět'ových úrovní IO-link standardu na UART a zpět bude použit integrovaný obvod MAX14821, který je přímo určený pro takovéto aplikace. Pro modulaci a demodulaci UART signálu bude použit HART modem MAX8500 od firmy MAXIM. Součástí zařízení bude i 24bitový analogově digitální převodník, který má za úkol číst hodnotu proudové smyčky HART komunikace, bude-li použita. V takovém případě by mohl převodník přímo odpovědět na příkaz čtení měřené veličiny zpracováním dat z AD převodníku. Převodník bude navržen ve čtyřvrstevném designu desky plošných spojů nejspíše v konstrukční třídě 2, což odpovídá rozměrům vodič /mezera od 150 μm do 300 μm .



Obr. 30. Blokové schéma převodníku

4.1. Návrh zapojení modulu mikrokontroléru

Modul mikrokontroléru je jednoduché zapojení 8mi bitového mikrokontroléru PIC16F1947 který obsahuje dvě rozhraní UART a dvě rozhraní SPI jež jsou vyvedeny na příslušné konektory, které zajišťují připojení ostatních modulů. Mikrokontrolér dále obsahuje ovladač přerušení, vnitřní EEPROM, časovače s nastavitelnými děliči vstupního hodinového signálu a disponuje, mnoha dalšími vlastnostmi jako je například přizpůsobená architektura pro programování v jazyce C. Dalším kritériem bylo, aby měl mikrokontrolér co nejnížší spotřebu. Jelikož PIC16F1947 je vytvořen CMOS technologií s architekturou NanoWATT plní i tento předpoklad. Mikrokontrolér bude programován přímo v navrženém obvodu pomocí rozhraní ICSP (In circuit serial programming). Pro lepší přehled o činnosti zařízení jsou na vstupně výstupní brány mikrokontroléru RE0, RE1, RE2 zapojeny tři LED diody s červenou, žlutou a zelenou barvou emitovaného světla. Tyto LED diody budou využity pro optickou detekci stavu, ve kterém se zařízení bude nacházet. Pro omezení proudu LED diodami na zhruba 2 mA jsou sériově s těmito diodami zapojeny odpory R2, R3, R4. Celé zapojení mikrokontroléru se zbylými částmi obvodu je pak uvedeno v příloze dokumentu.

4.1.1. Výpočty hodnot rezistorů:

Zelená dioda “READY” s označením LED1

$$I_D = 5 \text{ mA}, U_D = 2,2 \text{ V}$$

$$R2 = \frac{U - U_D}{I_D} = \frac{3,3 - 2,2}{5 \cdot 10^{-3}} = 220 \Omega$$

Žlutá dioda “BUSY” s označením LED2

$$I_D = 2 \text{ mA}, U_D = 1,8 \text{ V}$$

$$R3 = \frac{U - U_D}{I_D} = \frac{3,3 - 1,8}{2 \cdot 10^{-3}} = 750 \Omega$$

Červená dioda “ERROR” s označením LED3

$$I_D = 2 \text{ mA}, U_D = 1,8 \text{ V}$$

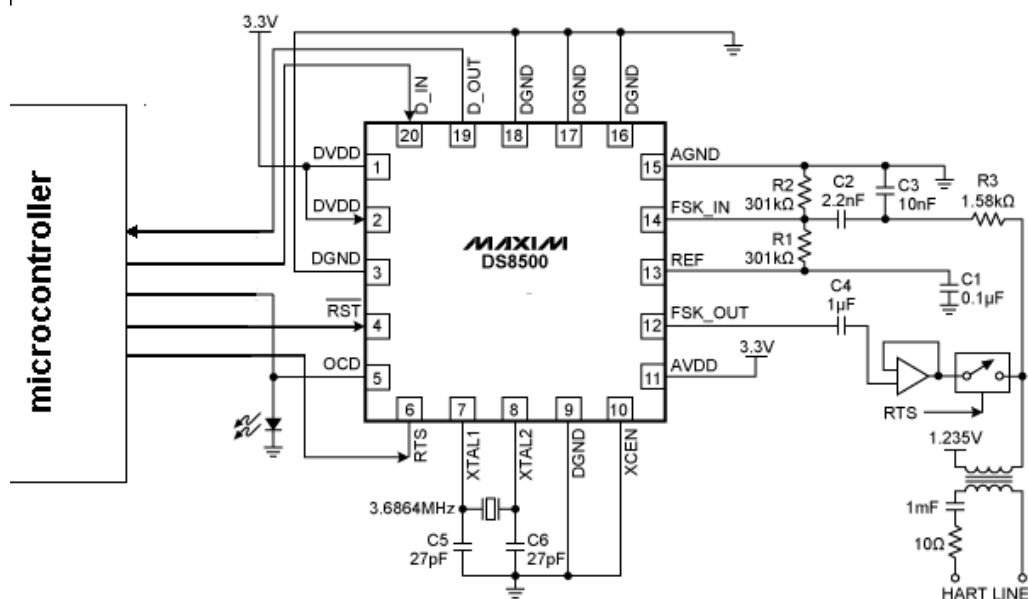
$$R4 = \frac{U - U_D}{I_D} = \frac{3,3 - 1,8}{2 \cdot 10^{-3}} = 750 \Omega$$

4.2. Návrh zapojení modulu HART modemu s AD převodníkem

4.2.1. Zapojení integrovaného obvodu DS8500:

Nejprve bych chtěl podotknout že náhrada celého tohoto zapojení se prodává jako komunikační modul HART MASTER zhruba za 95 USD. Tato cena je však velmi vysoká, protože cenu celého zařízení lze korigovat zapojením modemu na úrovni elektronických součástek.

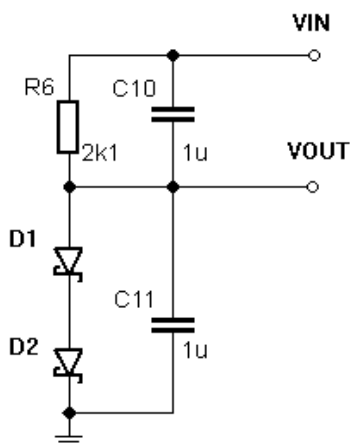
Zapojení HART modemu MAX8500 je na Obr. 31. 48 a je přesně popsáno v internetové publikaci [12], kde výrobce tento integrovaný obvod představuje odborné veřejnosti. V publikaci není popsán oddělovací transformátor, jelikož tento údaj podléhá patentní ochraně specifikace HART. Nicméně tento údaj jsem získal na diskusním fóru [13] týkajícího se tohoto dokumentu a lze využít jakéhokoli oddělovacího transformátoru odpovídajícího standardu V.23 s odporem vinutí 600Ω a vzájemnou indukčností cívek $0,5 \text{ H}$ se vzájemným převodem 1:1. Jako jednotkový zesilovač je použit integrovaný obvod MAX4040 jež byl rovněž zmíněn na fóru za vhodný. Funkci spínání při vysílání pak zajišťuje analogový polovodičový přepínač (tzv. switch) SPDT s typovým označením DG2011 firmy Vishay siliconix® s časem sepnutí výstupu 45 ns , časem vypnutí výstupu 29 ns , maximálním proudem kanálu 150 mA a odporem kanálu při sepnutí maximálně $1,8 \Omega$.



Obr. 31. Typické zapojení HART modemu na straně zařízení typu Master[12]

4.2.2. Vytvoření uzlu o napětí 1.235V:

Vytvoření uzlu s napětím 1.235 V je důležité pro správnou funkci zapojení HART modemu s integrovaným obvodem DS8500 od firmy MAXIM®. Trvalého napětí v uzlu lze dosáhnout zapojením dvou Shotkyho diod v propustném směru, jejichž výsledný součet napětí v propustném směru je 1,235 V. Klidový proud diodami se poté musí nastavit sériovým odporem tak aby i maximální odběr z uzlu neměl vliv na hodnotu napětí v uzlu. Pro zajištění lepší stability napětí v tomto uzlu se do zapojení ještě přidají paralelní kondenzátory s kapacitou 1 μ F.



Obr. 32. Schéma diodového napěťového děliče

4.2.3. Výpočet diodového napěťového děliče

$$U_{D1}=620\text{ mV}$$

$$U_{D2}=620\text{ mV}$$

$$U_{IN}=3,3\text{ V}$$

$$U_{OUT}=1,235\text{ V}$$

$$I_D=4\text{ mA}$$

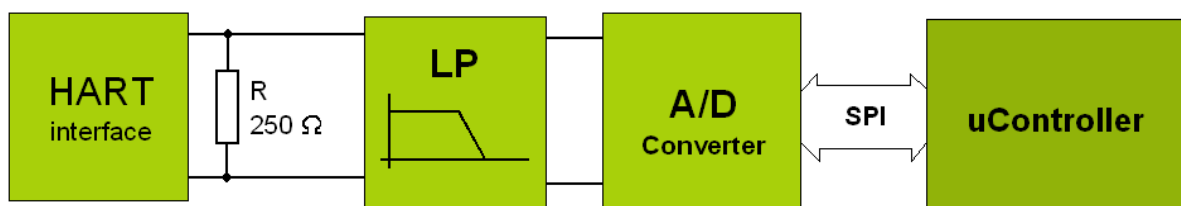
$$U_{OUT}=U_{D1}+U_{D2}=0,62+0,62=1,24\text{ V}$$

$$U_{R1}=U_{IN}-U_{OUT}=3,3-1,24=2,06\text{ V}$$

$$R1=\frac{U_{R1}}{I_D}=\frac{2,06}{4\cdot 10^{-3}}=510\Omega$$

4.2.4. Zpracování měronosného signálu proudové smyčky:

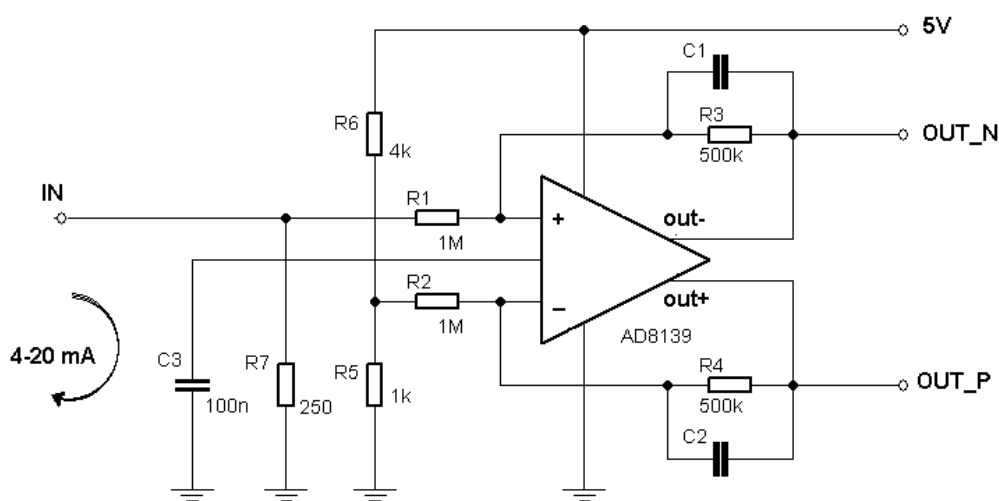
Aby bylo možné převádět měronosný signál v podobě proudové smyčky 4-20 mA na 24bitový digitální signál bylo nutné do konceptu začlenit 24bitový sigma-delta A/D převodník AD7791 se sériovou komunikací pomocí SPI (seriál peripheral interface). Tento převodník umožňuje číst informaci o hodnotě proudové smyčky během klidového režimu a v okamžiku vyžádání odeslat její poslední naměřenou hodnotu, což urychlí komunikaci s IO-link MASTER zařízením při přenášení pouze měronosného signálu a rovněž tak zařízení splňuje všechny možnosti standardu HART. Jelikož je nutné pro tento diferenční převodník upravit signál proudové smyčky v podobě úbytku napětí na zatěžovacím rezistoru smyčky, bylo nutné do návrhu začlenit zapojení diferenčního zesilovače AD8139 s kapacitou ve zpětné vazbě jako dolní propusti s tranzitním kmitočtem nastaveným na 100Hz.



Obr. 33. Úprava měronosného signálu

Zpracování měronosného signálu proudové smyčky je realizováno pomocí diferenčního zesilovače AD8139 od firmy Analog devices® který je svým negativním vstupním terminálem připojen na potenciál jednoho voltu odporového děliče což odpovídá minimální hodnotě proudu smyčky (4 mA). Pozitivní vstupní terminál předzesilovače je pak připojen na zatěžovací rezistor. Úbytek napětí na tomto rezistoru se pohybuje od 1V (při proudu smyčkou 4 mA) do 5V (při proudu smyčkou 20 mA) proto je zesílení nastaveno pomocí rezistorů na hodnotu 0,5. Z důvodu minimálního ovlivnění měronosného signálu je vstupní odpor operačního zesilovače tvořený

vstupním rezistorem připojeným na vstupní terminál a byl zvolen rezistor s odporem 1 MΩ. A/D převodník je tomuto přizpůsoben připojením referenčního napětí 2V nastaveného napěťovým děličem a z důvodu zesilovačem převráceného diferenčního napětí na výstupních terminálech zesilovače jsou překříženy vstupní terminály A/D převodníku. Jelikož je v proudové smyčce superponován i signál sériové komunikace musí být předzesilovač integračního charakteru. Toho lze docílit začleněním kondenzátorů do obou zpětných vazeb diferenčního zesilovače. Celkové schéma zapojení je v příloženém schématu.



Obr. 34. Zapojení operačního zesilovače jako dolní propusti

4.2.5. Výpočet pólu přenosu dolní propusti:

Pro výpočet je důležité nastavení pólu zpětné vazby na frekvenci 100Hz podle vzorce:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

$$f_0 = 100 \text{ Hz}$$

$$R_{1,2} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 1 \cdot 10^6} = 1,59 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

Nejbližší vyšší kapacita z řady běžně vyráběných kondenzátorů je 1,8 nF.

4.3. Návrh zapojení modulu linkového zesilovače IO-link

Zapojení linkového zesilovače MAX14821 je odvozeno od typického zapojení na Obr. 35. uvedeného v katalogovém listu integrovaného obvodu s tím rozdílem, že jsou vynechány porty pro připojení vstupního a výstupního spínaného signálu, jelikož nejsou tyto porty při převodu

komunikace ze standardu HART využitelné. Pro komunikaci s převodníkem je použito rozhraní SPI (serial peripheral interface), pomocí kterého bude integrovaný obvod nastavován a dotazován na interní data. Prostřednictvím UART rozhraní se vysílají a přijímají data samotné IO-link komunikace. Dále je přiveden na vstup přerušení INT mikrokontroléru signál WU značící začátek příchozí komunikace který by měl mikrokontrolér vybudit z režimu spánku. Celkové schéma zapojení je uvedeno v příloze dokumentu.

Obr. 35. Typické zapojení IO-link linkového zesilovače MAX14821[8]

Napájení celého zařízení bude realizováno pomocí nadřazeného standartu IO-link úrovní napětí mezi vodiči L+ a L- 24 V DC. Stejnou úroveň napětí používá i standard HART proto bude napájení HART linky provedeno jenom propojením obou konektorů na příslušné piny. Pro napájení mikrokontroléru bude využit integrovaný obvod MAX14820 který obsahuje integrované 5V a 3,3 V LDO regulátory napětí s proudovou zatížitelností 300 mA. Je nutné vyšetřit, jestli všechny klidové proudy všech částí zapojení zdaleka nepřekročí tuto hodnotu a zdali bude v napájení dostatečná rezerva. Pro tento účel slouží následující tabulka.

	Část zapojení	I (mA)
1	MAX4040	<1
2	DS8500	<1
3	AD8139	25
4	AD7791	<1
5	MAX14820	3
6	PIC16F1947	<2

7	DG2011	<1
8	LED diody	9
9	Odporový dělič ADC	1
10	Diodový dělič	4
	Celkem	48 mA

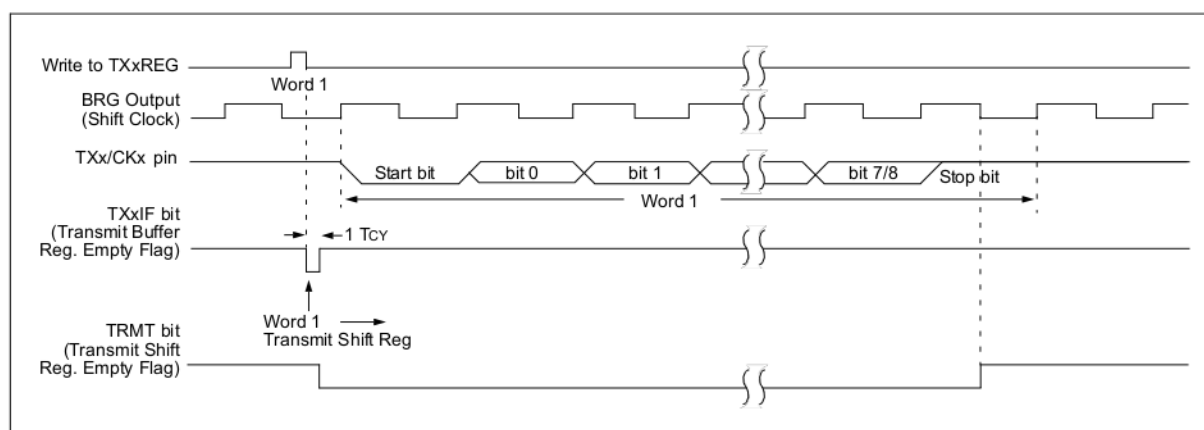
Z tabulky je patrné, že klidový odběr celého zařízení, je necelých 50 mA a tudíž napájení pomocí integrovaného LDO regulátoru s maximálním kontinuálním proudem 300 mA poskytuje dostatečné rezervy.

4.5. Použité sériové komunikační standardy

4.5.1. Sériové komunikační rozhraní UART (Universal asynchronous receiver transmitter)

Toto rozhraní je v zařízení použito pro vysílání a přijímání zpráv rozhraní IO-link a rozhraní HART. Jde o asynchronní sériovou komunikaci přes dvě datové linky, kdy jedna je použita pro komunikaci od mikrokontroléru do IO-link modemu a druhá z Iolink modemu do mikrokontroléru. Totéž zapojení je použito i pro připojení modemu fsk HART.

Asynchronní datový přenos UART je navržen tak, že nemá hodinový signál. Veškerá synchronizace přenosu je vytvořena přísnými nároky na časování. Komunikace je uvozena takzvaným startovním bitem kdy napětí na datové lince přejde ze stavu logické „1“ do stavu log „0“ tento startovní bit není počítán mezi přenášená data. Po startovním bitu jsou posílána data v podobě 8-bitového charakteru a jako poslední je devátý takzvaný paritní bit. Po přenesení devítibitové informace je nastavena opět log „1“.

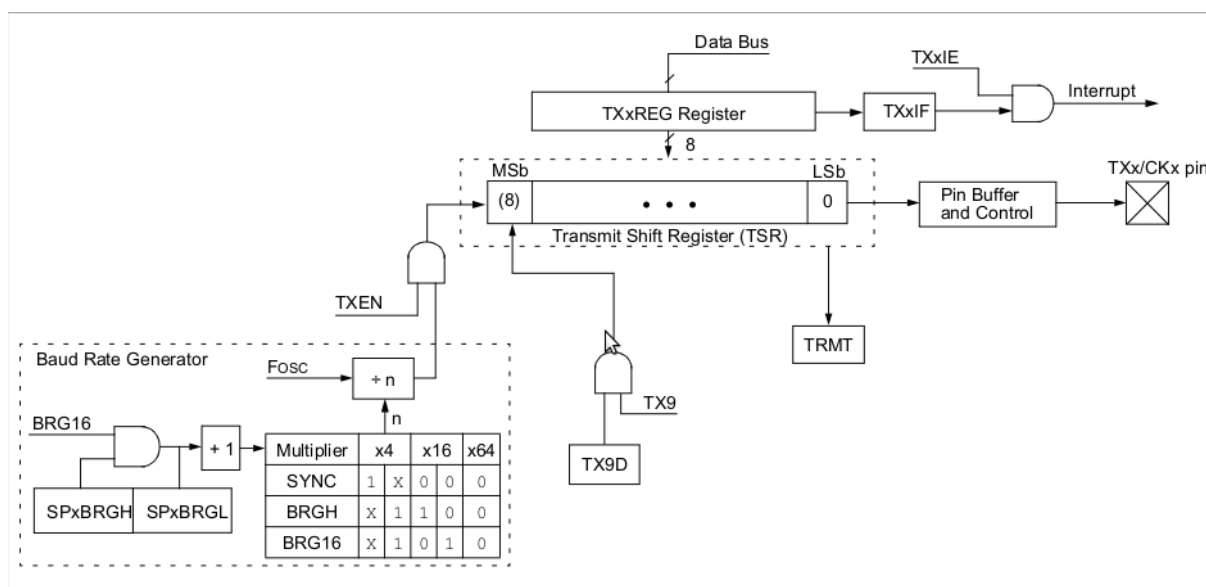


Obr. 36. Sériová komunikace pomocí linky UART[14]

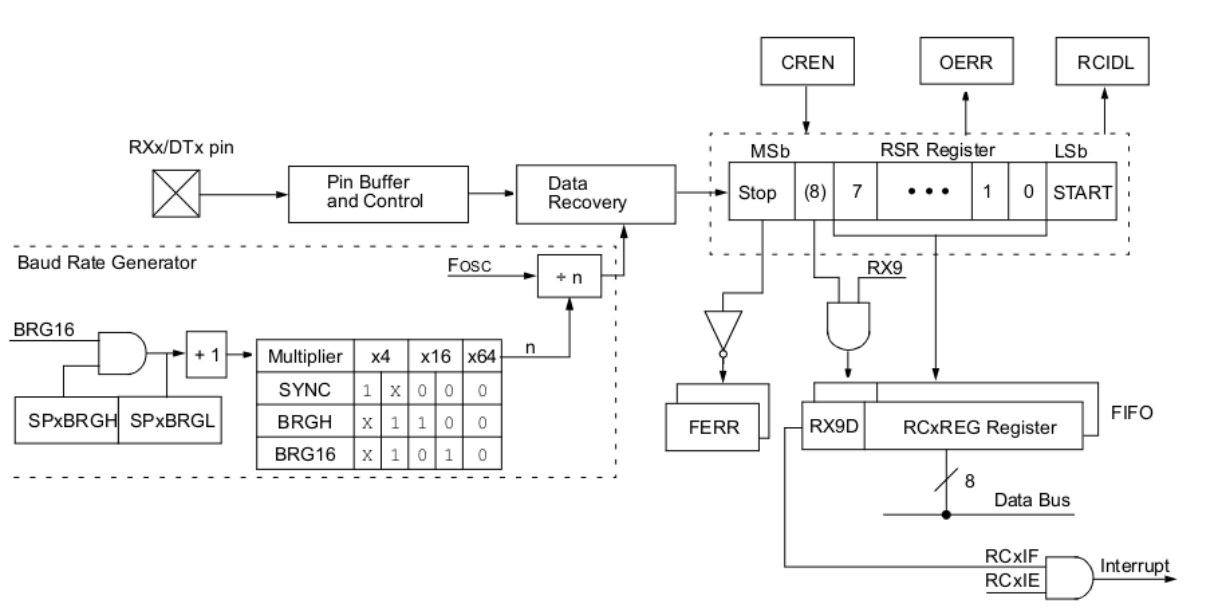
Synchronizace obou zařízení tak probíhá přes startovní bit a její funkce je možná za předpokladu, že vysílač i přijímač má shodnou periodu hodinového signálu. V navrženém převodníku jsou tyto

signály transformovány integrovanými obvody MAX14721 a DS8500 na příslušný princip přenosu signálu k příslušnému zařízení.

U mikrokontroléru je výhodné pro tuto funkci použít integrovaného rozhraní, které se u rodiny mikrokontrolérů PIC16 od firmy Microchip® označuje EUSART. Toto rozhraní tvoří vždy dvojice přijímače a vysílače.



Obr. 37. USART vysílač[14]



Obr. 38. USART přijímač[14]

Na obrázcích Obr. 37. a Obr. 38. je blokové schéma USART rozhraní, které se ovládá pomocí jednotlivých bitů v registrech uvedených na obrázcích níže. Tyto registry jsou přístupné z paměťové sběrnice mikrokontroléru a lze se tak tázat na přijatý znak, příznakové bity různých událostí nebo zapisovat do posuvného registru vysílače.

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
BAUD1CON	ABDOVF	RCIDL	—	SCKP	BRG16	—	WU ¹	ABDEN
BAUD2CON	ABDOVF	RCIDL	—	SCKP	BRG16	—	WUE	ABDEN
INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	IOCF	TMR0IF	INTF	IOCF
PIE1	—	ADIE	RC1IE	TX1IE	SSP1IE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
PIE4	—	—	RC2IE	TX2IE	—	—	BCL2IE	SSP2IE
PIR1	—	ADIF	RC1IF	TX1IF	SSP1IF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
PIR4	—	—	RC2IF	TX2IF	—	—	BCL2IF	SSP2IF
RC1REG	EUSART1 Receive Register							
RC1STA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
RC2REG	EUSART2 Receive Register							
RC2STA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
SP1BRGL	EUSART1 Baud Rate Generator, Low Byte							
SP1BRGH	EUSART1 Baud Rate Generator, High Byte							
SP2BRGL	EUSART2 Baud Rate Generator, Low Byte							
SP2BRGH	EUSART2 Baud Rate Generator, High Byte							
TRISC	TRISC7	TRISC6	TRISC5	TRISC4	TRISC3	TRISC2	TRISC1	TRISC0
TX1STA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	SENDER	BRGH	TRMT	TX9D
TX2STA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	SENDER	BRGH	TRMT	TX9D

Obr. 39. Registry spjaté s přijímací částí USART rozhraní[14]

Přijímač je navržen tak, že po startovním bitu začne posouvat přijímací registr a zapisovat postupně bit po bitu přijatou informaci. Po přijetí 8 bitů, paritního bitu a stop bitu se vyvolá přerušení. V tomto přerušení se musí programově zajistit výpočet paritního bitu RX9D v registru RCxSTA, aby se ověřila platnost přijatých dat. V tomto přerušení se také musí jako poslední instrukce vždy objevit vymazání příznakového bitu přerušení RCxIF v registrech PIRx.

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
BAUD1CON	ABDOVF	RCIDL	—	SCKP	BRG16	—	WUE	ABDEN
BAUD2CON	ABDOVF	RCIDL	—	SCKP	BRG16	—	WUE	ABDEN
INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	IOCIE	TMR0IF	INTF	IOCIF
PIE1	—	ADIE	RC1IE	TX1IE	SSP1IE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
PIE4	—	—	RC2IE	TX2IE	—	—	BCL2IE	SSP2IE
PIR1	—	ADIF	RC1IF	TX1IF	SSP1IF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
PIR4	—	—	RC2IF	TX2IF	—	—	BCL2IF	SSP2IF
RC1STA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
RC2STA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
SP1BRGL	EUSART1 Baud Rate Generator, Low Byte							
SP1BRGH	EUSART1 Baud Rate Generator, High Byte							
SP2BRGL	EUSART2 Baud Rate Generator, Low Byte							
SP2BRGH	EUSART2 Baud Rate Generator, High Byte							
TX1REG	EUSART1 Transmit Register							
TX1STA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	SENDER	BRGH	TRMT	TX9D
TX2REG	EUSART2 Transmit Register							
TX2STA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	SENDER	BRGH	TRMT	TX9D

Obr. 40. Registry spjaté s ovládáním vysílače USART rozhraní[14]

Vysílač USART rozhraní se používá tak, že se zapíše byte do registru vysílače TXxREG, vypočítá se paritní bit a zapíše se do registru TXxSTA bit TX9 a vynuluje se příznakový bit TRMT registru. Sestupná hrana signálu TRMT spustí posouvání registru a kopírování jeho hodnoty na výstupní I/O pin.

Nejdůležitější je však správné nastavení registrů ovládajících funkce rozhraní, jelikož rozhraní může být použito i v synchronním módu. Zvláštním úkolem při nastavování registru je správné nastavení děličky hodinového signálu. Nastavení děličky má totiž přímý vliv na rychlost přenosu a vypočítá se podle následující rovnice.

$$SPxBRGH : SPxBRGL = \frac{\frac{f_{osc}}{Baud}}{64} - 1 \quad [14]$$

Jelikož se dělí většinou frekvence 11,0592 MHz diskretním číslem je nutno výsledné číslo zaokrouhlit. Toto zaokrouhlení však vnese chybu v časování, která by se mohla projevit při přijímání či vysílání dlouhého datového rámce. Proto je nutné, aby tato chyba byla co nejmenší nejlépe desetiny procenta. Následující vztahy udávají výpočet chyby časování.

$$RealBAUD = \frac{f_{osc}}{(64/16) \cdot (SPxBRG + 1)} \quad [14]$$

$$Baud\ rate\ err = \frac{RealBAUD - teorBAUD}{teorBAUD} \quad [14]$$

4.5.2. Výpočty hodnot děliček hodinového signálu pro UART rozhraní

Výpočet hodnoty děličky UART1 rozhraní, jenž slouží jako fyzická vrstva protokolu IO-link.

Pro tento asynchronní přenos platí rychlost 4800 BAUD

$$SPxBRGH : SPxBRGL = \frac{\frac{fosc}{Baud}}{64} - 1 = \frac{\frac{11059200}{4800}}{64} - 1 = 35 \quad [14]$$

Jelikož u této rychlosti a frekvence je výsledek celočíselný bude chyba velice blízká 0 a bude v ní hrát roli pouze odchylka frekvence oscilátoru navíc dělená výsledkem výpočtu. Do bytu SP1BRGL se zapíše hodnota 0x23.

Výpočet předěličky UART2 rozhraní jenž slouží jako fyzická vrstva protokolu HART.

Pro tento asynchronní přenos platí rychlost 1000 BAUD

$$SPxBRGH : SPxBRGL = \frac{\frac{fosc}{Baud}}{64} - 1 = \frac{\frac{11059200}{1000}}{64} - 1 = 171,8$$

Nejbližší celočíselná hodnota je tak 172

$$RealBAUD = \frac{11059200}{(64) \cdot (172 + 1)} = 998,84\ BAUD$$

je nutné ověřit velikost chyby, jelikož z výrazu nevzešla celočíselná hodnota

$$Baud\ rate\ err = \frac{RealBAUD - teorBAUD}{teorBAUD} = \frac{998,84 - 1000}{1000} = -0,116\ \%$$

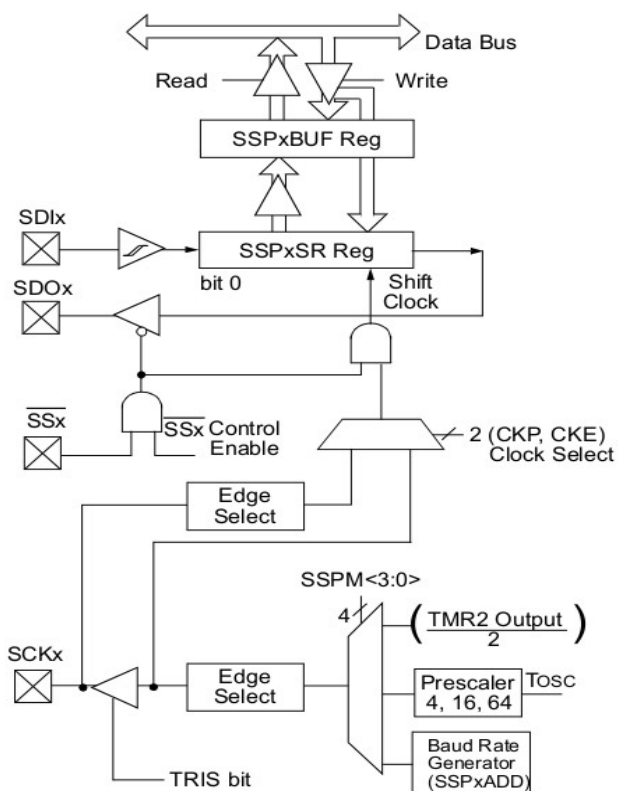
Hodnota chyby pod 0,5% je přijatelnou pro spolehlivost přenosu.

4.5.3. Sériové komunikační rozhraní SPI (Serial peripheral interface)

Pro komunikaci s ovládacími obvody modemu IO-link MAX14821 je využito rozhraní SPI, které ke své činnosti využívá čtyřech vodičů. Jde o sériový přenos dat dvěma směry současně po linkách MISO a MOSI přičemž data jsou nastavována na sestupnou hranu signálu SCK a validní jsou až na náběžnou hranu hodinového signálu. V tuto chvíli se také zapisují do přijímacích registrů hardwarových rozhraní.

Hardwarové rozhraní této komunikace představuje u mikrokontrolérů řady PIC16 tzv. Master synchronous serial port. Na rozdíl od UART rozhraní, u tohoto rozhraní se data zapisují do registru

SSPxBUF, zápis dat do tohoto registru pak spustí přenos dat. Ten probíhá oběma směry současně a po skončení přenosu se přepíše hodnota v registru na hodnotu přijatého bytu. Jelikož komunikaci řídí pouze master zařízení, je při přenosu posloupnosti dat nutné zapisovat alespoň nuly, aby bylo zaručeno přečtení bytu z buffer-registru slave zařízení. Většina slave zařízení využívajících ke komunikaci právě standardu SPI, na nulovou zprávu nereaguje pouze odesílá data vyžádaná předešlou zprávou.



Obr. 41. MSSP – SPI hardwarové rozhraní[14]

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
ANSELA	ANSA7	ANSA6	ANSA5	ANSA4	ANSA3	ANSA2	ANSA1	ANSA0
APFCON	P3CSEL	P3BSEL	P2DSEL	P2CSEL	P2BSEL	CCP2SEL	P1CSEL	P1BSEL
INTCON	GIE	PEIE	TMR0IE	INTE	IOCIE	TMR0IF	INTF	IOCIF
PIE1	TMR1GIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
PIE4	—	—	RC2IE	TX2IE	—	—	BCL2IE	SSP2IE
PIR1	TMR1GIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
PIR4	—	—	RC2IF	TX2IF	—	—	BCL2IF	SSP2IF
SSP1BUF	Synchronous Serial Port Receive Buffer/Transmit Register							
SSP2BUF	Synchronous Serial Port Receive Buffer/Transmit Register							
SSP1CON1	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM<3:0>			
SSP1CON3	ACKTIM	PCIE	SCIE	BOEN	SDAHT	SBCDE	AHEN	DHEN
SSP1STAT	SMP	CKE	D/Ā	P	S	R/Ā	UA	BF
SSP2CON1	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM<3:0>			
SSP2CON3	ACKTIM	PCIE	SCIE	BOEN	SDAHT	SBCDE	AHEN	DHEN
SSP2STAT	SMP	CKE	D/Ā	P	S	R/Ā	UA	BF
TRISA	TRISA7	TRISA6	TRISA5	TRISA4	TRISA3	TRISA2	TRISA1	TRISA0
TRISB	TRISB7	TRISB6	TRISB5	TRISB4	TRISB3	TRISB2	TRISB1	TRISB0

Obr. 42. Registry spjaté s ovládáním a kontrolou MSSP hardwarového rozhraní [14]

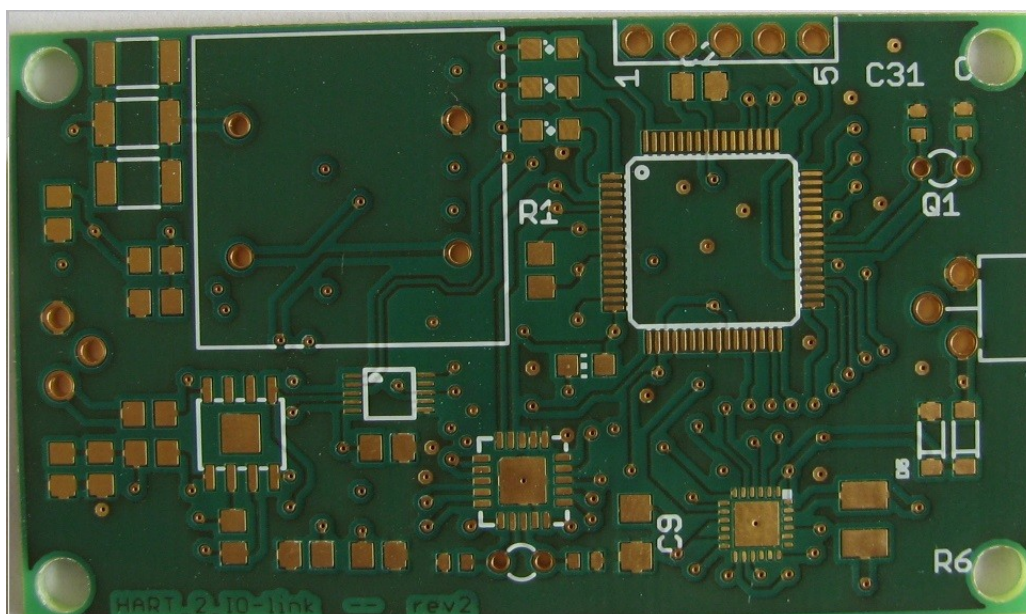
5. Návrh desky plošných spojů převodníku, její výroba a osazení

Návrh desky plošných spojů probíhal v návrhovém prostředí CADsoft Eagle 6.5. Výsledný layout zařízení je vměstnán na ploše 60x30 mm a pro vzájemné propojení všech signálů bylo nutné navrhout desku plošných spojů se čtyřmi vrstvami.

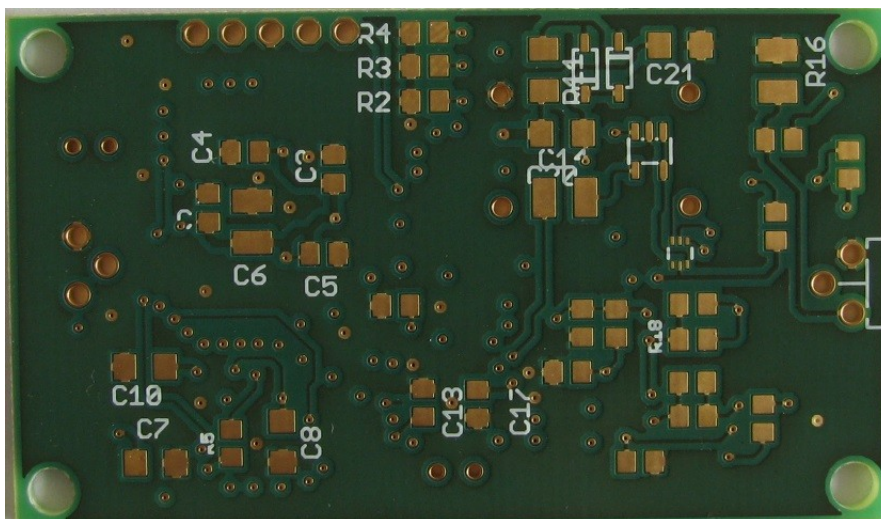
Při návrhu bylo použito SMD čipů rezistorů velikosti 0805, pokud to bylo možné z hlediska výkonové zatížitelnosti. Kondenzátory jsou v návrhu zastoupeny v hojném počtu druhů i velikostí. Tam, kde to situace dovozovala, bylo použito běžných keramických tenkovrstvých kondenzátorů od velikosti 1210 až po miniaturní velikost 0402. Speciálním případem je trojice kondenzátorů tvořících spolu s odporem horní propust pro přenos signálu superponovaného na proudovou smyčku. Tyto kondenzátory jsou tantalové v pouzdře označeném Typ B o velikosti 4x5 mm.

Deska plošných spojů byla s ohledem na cenu výroby navržena podle návrhových pravidel pro konstrukční třídu přesnosti VI, kdy v této třídě je minimální šířka vrtaného otvoru 0,3 mm, minimální rozměr vodiče 0,15 mm a minimální rozměr mezery 0,2 mm.

Takto navržená deska byla vyrobena Technologií POOL servis ve společnosti Gatema Boskovice s povrchovou úpravou chemického nanesení tenké vrstvy Ni-Au, které se také říká immersní zlato.



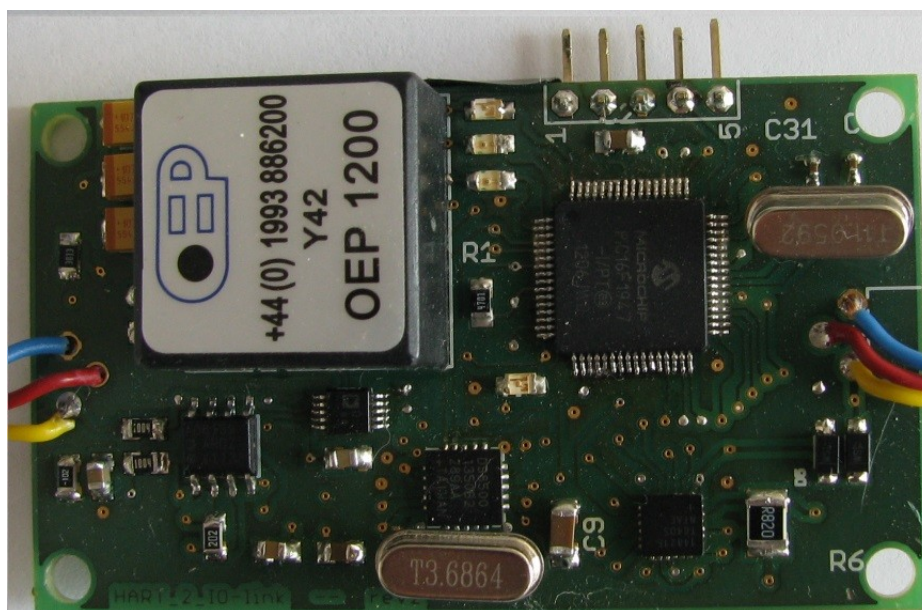
Obr. 43. První verze DPS ve čtyřvrstvě provedení strana TOP



Obr. 44. První verze DPS ve čtyřvrstevném provedení strana BOTTOM

Po kroku výroby prototypové desky bylo nutné desku plošných spojů osadit součástkami. Pro tuto činnost bylo využito pracoviště pájení, které mám k dispozici v mém současném zaměstnání. Pracoviště obsahuje veškeré nezbytné nářadí a chemii pro osazování prototypových desek plošných spojů a jejich následné čištění a optickou kontrolu pod lupou s velkým zvětšením.

Při osazování desek byly zjištěny dvě chyby designu. První chyba vznikla nepozorností při výběru typů krystalových rezonátorů, kdy ve snaze využít co nejmenší součástky byl použit typ s tvarem válečku o podstavě 3,2 mm a délkou 8 mm v pouzdře TC26 který se běžně vyrábí pouze s rezonančními frekvencemi do 1 MHz. Druhá chyba byla do designu zavedena společně s knihovnou přejatou z internetového zdroje návrhářské komunity ELEMENT 14, kdy se jednalo o nedodržení správného sledu pinů. Napájecí pin tak vedl namísto napájení na vstupní signál jednotkového zesilovače MAX4040 a naopak pin pozitivního vstupu zesilovače vedl na napájecí signál a obvod tak vykazoval chybové chování již při měření pracovního bodu zesilovače. Tento obvod se skrývá na prototypové desce na straně BOTTOM a byl připojen do obvodu za pomoci tenkých drátků a pájení. Chybový layout integrovaného obvodu lze spatřit v červeném kolečku na Obr. 46. dolní strany již osazené desky.



Obr. 45.

Obr. 45.

Obr. 45.

Obr. 45.

Obr. 45.

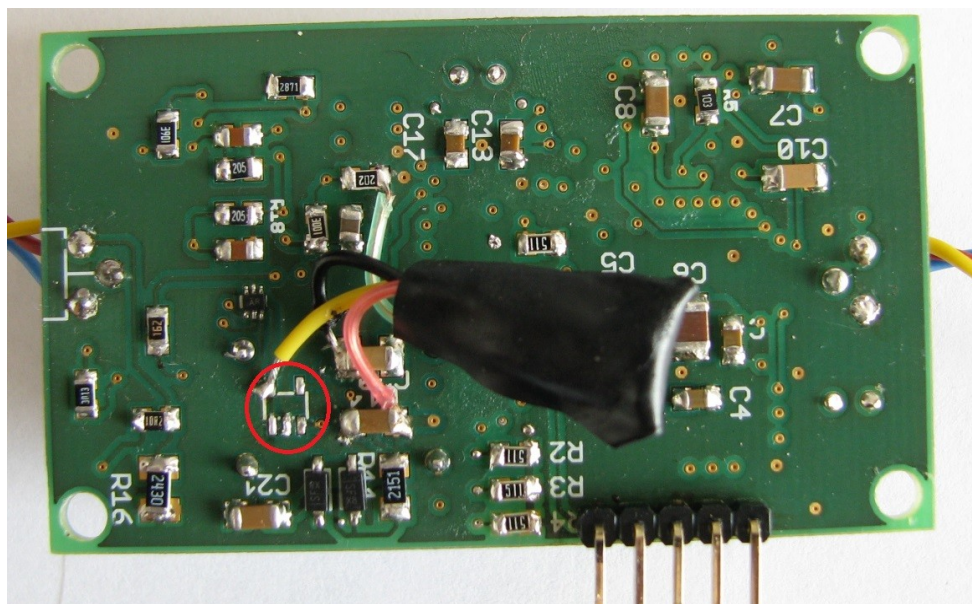
Obr. 45.

Obr. 45.

Obr. 45.

Obr. 45.

Fotografie osazené DPS převodníku strana TOP



Obr. 46.

Obr. 46.

Obr. 46.

Obr. 46.

Obr. 46.

Obr. 46.

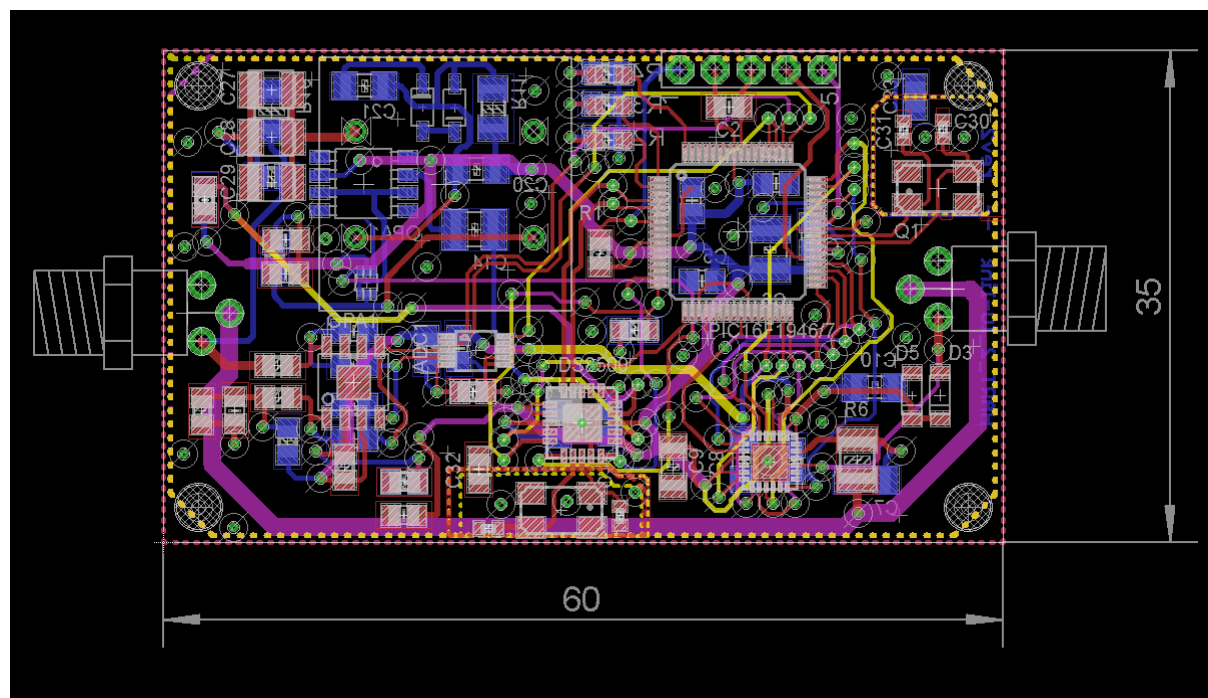
Obr. 46.

Obr. 46.

Obr. 46.

Fotografie osazené DPS strana BOTOM

Po odstranění všech chyb byla udělána revize DPS jenž je uvedena už jako finální verze. V příloze diplomové práce je uvedena její kompletní technická dokumentace. Pro názornou ukázkou složitosti layoutu je na Obr. 47. zobrazení ve vývojovém prostředí CADsoft Eagle.



Obr. 47. Snímek designu DPS v návrhovém prostředí CADsoft Eagle

6. Programové vybavení převodníku

Návrh programového vybavení probíhal ve vývojovém prostředí MPLAB X od společnosti Microchip a program se nahrával do mikrokontroléru pomocí zařízení PIC Kit 3 s jehož pomocí lze i vyčítat paměť a krokovat program. Bylo využito pouze základní knihovny obsahující adresy paměťových bloků periférií mikrokontroléru a každý řádek obsahující výraz z knihovny byl náležitě okomentován. Projekt programu je pro lepší orientaci rozčleněn do více souborů přičemž struktura tohoto rozdělení kopíruje hlavní části převodníku.



Obr. 48. Ilustrační obrázek programátoru a debuggeru PICkit 3 [24]

6.1. Konstrukce programového vybavení

6.1.1. Použité vlastní předprogramované funkce

Funkce mikrokontroléru:

Jsou to základní funkce v podobě jednoduchých posloupností příkazů, které obsahuje soubor fce.c připojený k diplomové práci v elektronické příloze. Psaní funkcí v přidružených souborech je vhodné pro odstranění veškerých možných definic registrů knihovny mikrokontroléru z hlavních částí programu a umožňuje tak lepší změnu v případě přechodu na jinou platformu. Takto postavený projekt přináší výhodu lepší orientace v kódu.

Funkce nutné pro komunikaci se snímačem HART

Jsou funkce které mají co dočinění s obsluhu protokolu HART. Tyto funkce jsou v souboru HART.c a patří mezi ně hlavně příjem a odesílání paketů, ovládání modemu a kontrola přerušení z UART rozhraní přidruženého k HART modemu.

Funkce nutné pro komunikaci s IO-link master

Jsou funkce v souboru Iolink.c použité pro obsluhu protokolu Iolink. Patří mezi ně odesílání a přijímání datových paketů z rozhraní IO-link, počítání komprimované parity počítání timeoutu komunikace od zařízení HART.

6.1.2. Hlavní smyčka programu

Hlavní smyčka programu je stavový automat vytvořený pomocí C výrazu „switch“ a tvoří aplikační vrstvu protokolu IO-link v počátečním stavu testuje rozhraní UART1, jenž je přiřazeno právě komunikaci s IO-link linkovým zesilovačem. Z tohoto rozhraní by měla přijít startovní zpráva, kdy IO-link master zařízení testuje rychlost komunikace SLAVE zařízení od nejvyšší 230,4 kBaud po nejnižší což je 4800 Baud. Pokud zařízení detekuje startovní zprávu přesune se stavový automat do stavu, kdy začne rozlišovat mezi procesními daty, daty na vyžádání, diagnostickými daty a servisními daty.

Pro vyžádání dat od snímače HART byl zvolen způsob komunikace pomocí servisní adresy obsahující samé nuly. Tento způsob komunikace není povolen při provozu více zařízení na jedné proudové smyčce jelikož by všechna zařízení odpovídala najednou, ale pro účely kdy je na smyčce pouze jedno zařízení lze tento způsob s výhodou použít. Tato výhoda spočívá v zjednodušení vysílané hlavičky paketu na 3byty s hodnotou 0xff , oddělovače, nulové servisní adresy a HART příkazu.

6.2. Oživení převodníku a ladění programového vybavení

6.2.1. Použité přístroje a přípravky

Jak už bylo řečeno pro ladění programu byl využit nástroj PICkit3 se softwarem MPLAB. Pro ověřování průběhů signálů a měření při oživování různých částí obvodu byl využit dvoukanálový digitální osciloskop Tektronix TDS1002, který jsem si pro tyto účely zapůjčil v zaměstnání. Tento přístroj lze využít také jako voltmetr a pro potřeby ověření obvodových veličin a ladění jeho funkce bohatě dostačují.

Jako zařízení využívající pro komunikaci protokolu HART byl použit diferenční snímač tlaku s rozsahem 0-10 bar s označením DMP 331 od firmy BD Sensors s výstupem v podobě proudové smyčky 4-20 mA. Tento snímač žádné komunikační rozhraní nemá. Pro funkci vzdáleného přístupu lze připojit ke snímači zobrazovací a komunikační jednotka PA 430 pomocí které se snímač připojuje do automatizačních sítí HART.

Pro ověření komunikace pomocí protokolu IO-link jsem obdržel od vedoucího diplomové práce vývojový nástroj IO-link Evalvation Kit of firmy infineon.

6.2.2. Oživení a ladění softwaru převodníku

Při tomto kroku byl připojen převodník ke zdroji napětí 24V, který v našem případě představoval cestovní adaptér s požadovaným napětím 24V a výstupním výkonem 12 W. Měřením napětí napájecích uzlů byla prokázána správná funkce napěťových regulátorů obvodu MAX14821. Dále pak bylo ověřeno referenční napětí AD převodníku které činilo 2,03 V a napětí na uzlu plovoucího potenciálu o hodnotě 1,235 V jež slouží jako bod středního napětí fsk výstupu HART modemu DS8500.

Po ověření napětí v důležitých částech obvodu bylo přikročeno k připojení ostatních zařízení, potřebných k ověření funkce převodníku, snímače s HART zobrazovacím terminálem a vývojového kitu IO-link. Po připojení snímače dvou vodičovým zapojením došlo k inicializaci displeje terminálu a měřením na terminačním rezistoru proudové smyčky s odporem 250 Ω . Na rezistoru bylo naměřeno napětí 1,02 V což zhruba odpovídá proudu smyčkou o hodnotě 4 mA. Další činností bylo ověření správných funkcí sériových rozhraní a funkcí samotných převodů komunikačního signálu UART - HART a UART – IO-link. Ověření probíhalo tak že se mikrokontrolér uvedl do nekonečné smyčky v níž vysílal byty 0xAA. Test inicializace a vysílání všech sériových rozhraní dopadl úspěšně, ale nepodařilo se naměřit žádný střídavý signál na výstupu fsk HART modemu DS8500. Místo toho bylo na výstupním pinu napětí 2,73 V. Po proměření všech uzlů souvisejících s modemem bylo zjištěno podivné chování vstupně výstupního pinu RST který by měl po připojení na potenciál 3,3V výstupním pinem mikrokontroléru vykazovat stejnou hodnotu ale na tomto uzlu po inicializaci pinem bylo trvalé napětí 300mV. Zkusil jsem tedy vyměnit celý integrovaný obvod. Po výměně integrovaného obvodu došlo ke stejnému chování.

Rozhodl jsem se proto využít AD konverze proudové smyčky a vyzkoušet alespoň navázání komunikace přes IO-link rozhraní

Připojení IO-link evalvation kitu a následná zkouška komunikace přes rozhraní IO-link dopadla rovněž katastrofou. V tomto kitu totiž není žádný software a přibalené CD obsahuje pouze datasheet od IO-link chipu použitého v tomto kitu. Potřebný software pro toto zařízení je nutné pořídit u jedné ze tří firem spolupracujících s firmou infineon na než se výrobce kitu odkazuje na svých internetových stránkách.

Po tomto nezdaru už z časových důvodů nezbývalo než opravit chyby v návrhu hardwaru převodníku ukončit práci na softwaru a sepsat

Závěr:

V diplomové práci byl nejprve položen teoretický základ k problematice měření fyzikálních veličin. Zvláště pak tlaku jako jedné z velmi často měřených procesních veličin bylo v práci věnováno mnoho času. Byl popsán snímač jako zařízení pro konverzi fyzikálních veličin na veličiny elektrické. V práci byly vyneseny požadavky na SMART senzory a byly také diskutovány jejich výhody a možnosti nabízející se ruku v ruce s jejich použitím v moderních automatizovaných provozech. Byly též předneseny požadavky připojení inteligentních snímačů do moderních automatických provozů, které v drtivé většině případů vyžadují vzdálenou diagnostiku a servisní přístup. Dále jsou v projektu rozebrány moderní komunikační standardy HART a IO-link z hlediska ISO OSI modelů a z tohoto teoretického základu je poté vyvozen návrh plnohodnotného převodníku mezi těmito standardy, využívající ke své činnosti 8-bitový mikrokontrolér PIC16F1947, jenž má být použit pro připojení snímačů tlaku využívajících ke své činnosti komunikační protokol HART, do automatického provozu řízeného prostřednictvím nadřazené zprávy automatizačních procesů, která mimo vyšších síťových vrstev, ve své nejnížší vrstvě používá distribuovaných vstupně výstupních modulů s komunikačním protokolem IO-link.

V práci je docíleno návrhu a výroby prototypového zařízení převodníku. Toto prototypové zařízení vykazovalo tři chyby z nichž jedna měla pro další práci fatální následky. Jednalo se o disfunkci modemu DS85000, dále špatné zapojení SPI pro komunikaci s AD převodníkem a špatné zapojení jednotkového zesilovače MAX4040. Z odstranění těchto chyb vychází finální návrh desky plošných spojů o rozměrech 60x35 mm ve čtyřvrstevném layoutu, jehož výrobní dokumentace je uvedena v příloze diplomové práce.

V poslední řadě byla část návrhu programového vybavení převodníku. Vzhledem k naprosté disfunkci většiny potřebných částí obvodu, časové náročnosti hledání chyb v designu a blížícímu se odevzdání práce se podařilo naprogramovat a softwarově odladit pouze dílčí funkce odesílání paketů, výpočtů podélné liché parity a komprimované parity. Projekt tudíž vyžaduje výrobu dalšího prototypu a doprogramování softwaru.

Bibliografické citace:

[1] PEŠL, J. Implementace rozhraní IO-link do snímačů tlaku: Semestrální práce.

Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.

<http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf> 24.11.2011

[2] *AUTOMA- časopis pro automatizační techniku* 07/2004 www.odbornecasopisy.cz

http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32435 25.11.2011

[3] ČOŽÍK, O. *Programové vybavení snímače tlaku s protokolem HART*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 59s.

[4] *IO-link – popis digitální komunikace pro senzory* automatizace.hw.cz

<http://automatizace.hw.cz/iolink-popis-digitalni-komunikace-pro-senzory> 30.10.2011

[5] *IO- link Interface and system specification Version 1.1, November 2010* www.io-link.com

http://www.io-link.com/.../IOL-Comm-Spec_10002_V11_090118.pdf 15.10.2011

[6] katalogový list součástky DS8500 firmy Maxim-IC <http://www.maxim-ic.com>

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS8500.pdf> 4.12.2011

[7] Popis protokolu HART výrobce snímačů SAMSON www.samson.de

http://www.samson.de/pdf_en/l452en.pdf 4.12.2011

[8] Katalogový list integrovaného obvodu MAX14821 www.maxim-ic.com

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX14821.pdf> 10.12.2011

[9] Microcyber HT1200M User manual <http://www.hartcommproduct.com>

<http://www.hartcommproduct.com/...../Microcyber/HT1200M.pdf> 9.12.2011

[10] P. Rybka, S. Ďaďo, M. Kreidl, J. Novák, *Senzory a převodníky* – Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03123-3

[11] Internetová encyklopedie www.wikipedia.org

[12] Introduction to the DS8500 HART Modem www.maxim-ic.com

<http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4676> 11.12.2011

[13] Maxim blog www.maxim-ic.com

http://www.maxim-ic.com/blogs/bl...m=1&doc_type=qv&doc_id=5960 14.12.2011

[14] Katalogový list mikrokontroleru PIC16F1947 www.microchip.com

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41414C.pdf> 12.12.2011

[15] Elektronický učební text www.umel.feec.vutbr.cz

http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_1_2.htm 5.5.2014

- [16] Učební text [www.roznovskastredni.cz](http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf)
<http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf> 24.11.2011
- [16] Elektronický katalog www.automationdirect.com
http://www.automationdirect.com/adc/Overview/Catalog/Sensors_-z-_Encoders 24.5.2014
- [17] Učební text www.matfyz.eu
<http://www.matfyz.eu/dokumenty/sminimum/1A3C-mechanika-kapaliny-plyny.pdf> 24.5.2014
- [18] Učební texty www.kod.tul.cz/predmety/AOV/dalsi_mat/TLAK01.DOC 24.5.2014
- [19] Virtuální laboratoř – elektronické texty [www.fme.vutbr.cz](http://ottp.fme.vutbr.cz)
<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-11.htm> 25.5.2014
- [20] Technický portál www.controlengcesko.com
<http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/technologie-tlakovych-senzoru/>
- [21] HART Application NOTE <http://www.analogservices.com>
<http://www.analogservices.com/hstart.htm> 12.12.2011
- [22] Technický portál www.instrumentationtoday.com
<http://www.instrumentationtoday.com/basic-instrumentation/transducers/page/2/> 25.5.2014
- [23] Informační portál [www.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Blockbild-Pirani-Vakuumeter.png> 25.5.2014
- [24] Northern Arizona University E-learning www4.nau.edu
<http://www4.nau.edu/microanalysis/microprobe-sem/instrumentation.html> 25.5.2014
- [25] Francouzský portál IT technologií www.gradot.wordpress.com
<http://www4.nau.edu/microanalysis/microprobe-sem/instrumentation.html> 28.5.2014