

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY**

**Odbor mechaniky a mechatroniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Absolutní odměřovací systémy úhlu a polohy**

Vedoucí práce: Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D

Autor: Kristián Kraevski

Praha, 2018



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kraevski** Jméno: **Kristián** Osobní číslo: **439168**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Absolutní odměřovací systémy úhlu a polohy**

Název bakalářské práce anglicky:

**Absolute Angle and Position Measuring Systems**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši absolutních odměřovacích systémů úhlu a polohy
2. Realizujte komunikaci se senzorem podporujícím standard EnDat 2.2 a procesorem F28379D
3. Ověřte funkčnost navrženého řešení
4. Kriticky zhodnotte dosažené výsledky

Seznam doporučené literatury:

- Encoder communication handbook, Dynapar, 2007
- Universal Digital Interface to Absolute Position Encoders, TIDIAN5A TI Reference design, Texas Instruments, 2015
- Technical information, EnDat 2.2 ? Bidirectional Interface for Position Encoders, Dr. Johannes HEIDENDAIN GmbH, Germany 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

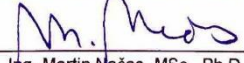
**Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, dne .....

Podpis: .....

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Martinu Nečasovi MSc. Ph.D. za všechno vynaložený čas, úsilí a trpělivost při vedení mé práce. Také si dovoluji poděkovat Janu Juránkovi za vývoj a výrobu hardwaru.

# Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Kristián Kraevski
<b>Název bakalářské práce:</b>	Absolutní odměřovací systémy úhlu a polohy
<b>Anglický název:</b>	Absolute Angle and Position Measuring Systems
<b>Akademický rok:</b>	2017/2018
<b>Obor studia:</b>	Teoretický základ strojíního inženýrství
<b>Ústav/odbor:</b>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor mechaniky a mechatroniky
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Martin Nečas MSc. Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	počet stran: 39 počet obrázků: 24 počet příloh: 1
<b>Klíčová slova:</b>	absolutní, odměřování, poloha, enkodéry, protokol
<b>Keywords:</b>	absolute, measuring, position, encoders, interface

## **Anotace:**

Cílem práce je vytvoření funkčního komunikačního kanálu mezi senzorem podporujícím protokol EnDat 2.2 a mikrokontrolerem Texas Instruments C2000.

## **Abstract:**

The aim of the thesis is to implement a communication junction between an EnDat 2.2 encoder and a microcontroller Texas Instruments C2000.

# Obsah

Obsah .....	6
1 Úvod.....	8
2 Odměřovací systémy.....	9
2.1 Odměřovací systém .....	9
2.2 Enkodéry a komunikace .....	9
2.3 Inkrementální / relativní měření .....	10
2.4 Absolutní měření .....	11
3 Fyzikální principy absolutního odměřování .....	12
3.1 Odporové .....	12
3.2 Indukční .....	15
3.2.1 LVDT.....	15
3.2.2 Resolver.....	16
3.3 Magnetické.....	17
3.3.1 Hallův jev .....	17
3.3.2 Magnetorezistivní .....	19
3.4 Optické.....	20
4 Výrobci.....	20
4.1 Renishaw .....	20
4.2 TReletronic.....	22
4.2.1 Rotační enkodéry pro průmyslové aplikace .....	22
5 Protokoly .....	23
5.1 Obecně .....	23
5.1.1 Základní princip.....	23
5.2 Otevřené protokoly.....	23
5.2.1 Biss-C .....	23
5.3 Proprietární protokoly .....	24
5.3.1 SSI.....	24
6 Experimentální část.....	24
6.1 Heidenhain EIB 741 .....	24
6.2 Heidenhain AT 1218.....	25
6.3 Texas Instruments C2000 F28379D.....	26
6.4 TIDM-1008 Reference Design.....	29
6.4.1 SN65HVD78 .....	29
6.4.2 TPS22918-Q1 .....	29
6.5 DesignDRIVE Position Manager EnDat22 library .....	29
6.5.1 Podporované příkazy pro EnDat 2.2.....	30
6.5.2 Funkce knihovny .....	30
6.6 Výroba hardwaru a kódu .....	32

6.7	Testovací měření a evaluace .....	32
7	Závěr .....	35
8	Seznam obrázků a tabulek .....	36
9	Seznam použité literatury .....	37
	Přílohy: .....	38

# 1 Úvod

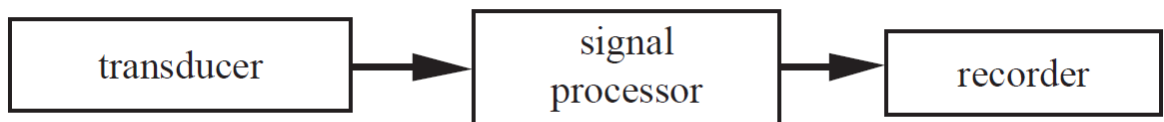
Moderní průmyslová výroba si žádá zvyšující se nároky na přesnost, kvalitu a rychlost. Jedná se o multidisciplinární problém vyžadující optimalizaci všech faktorů, jež mají vliv na konečný výrobek. Automatizace výrobních procesů v tomto hraje jednu z hlavních rolí. Při návrhu pohonů automatizovaných struktur je často nutné mít spolehlivý odměřovací systém. Ať už jde o odměřování přímé nebo nepřímé, senzory a enkodéry poskytují cennou zpětnou vazbu, která dovoluje pohony regulovat. Může být řeč o robotickém manipulátoru s více stupni volnosti nebo o klasickém tříosém CNC, absolutní odměřovací systémy poskytují výhodu s ohledem na bezpečnost a spolehlivost. Odměřovací systémy však nejsou jen přesné senzory. Významně se podílí i z nich vystupující komunikační kanály, jež zajišťují rychlý přenos dat do řídicích jednotek. Rešerše této práce se orientuje na fungování samotných enkodérů a praktická část pak adresuje právě problematiku sériové komunikace pro přenos dat z enkodérů.



## 2 Odměřovací systémy

### 2.1 Odměřovací systém

Odměřovací systém se skládá ze tří klíčových prvků. Prvním z nich je senzor, což je zařízení přeměňující fyzický stav/vstup ve výstup v podobě elektrického signálu. Tento článek se dá označit jako „převodník“ určitého druhu energie v energii elektrickou. Následuje elektronika, která signál zpracuje filtrováním, zesílením nebo digitalizací. Poslední neodlučitelnou komponentou je zaznamenávací zařízení, což může být mikroprocesor, pevný disk nebo třeba display zpřístupňující data k dalšímu zpracování. [1] Úkolem vývojáře je vhodná volba těchto tří základních bloků s ohledem na jejich parametry, limitace a vhodnost pro danou aplikaci.



Obr. 1 Schéma odměřovacích systémů [1]

### 2.2 Enkodéry a komunikace

Enkodéry nazýváme senzory, které vysílají digitální nebo analogový signál v reakci na zaznamenání polohy. Existuje hned několik parametrů, podle nichž můžeme enkodéry dělit. Nejelementárnějším kritériem je, jestli zjišťujeme změnu délky nebo úhlu. Z těchto hodnot pak můžeme dodatečným zpracováním zjišťovat přímo či nepřímo i další odvozené veličiny – například rychlost, zrychlení nebo jerk (změna zrychlení). [2] [3]

Při návrhu nás také zajímá, zda enkodér patří do kategorie absolutních nebo inkrementálních senzorů. Rozdíl spočívá v samotném základním vyhodnocování dat. U inkrementálních senzorů příslušná elektronika zaznamenává počet proběhlých pulzů od referenčního bodu. Hlavní nevýhodou je právě nutnost najíždění do těchto referenčních poloh při každém zapnutí stroje nebo při výpadku proudu. Při tomto najíždění pak může při neopatrné manipulaci dojít ke kolizním stavům. Nebezpečí katastrofických následků představuje i chybné spočtení pulzů při rychlém pohybu. [2] [3]

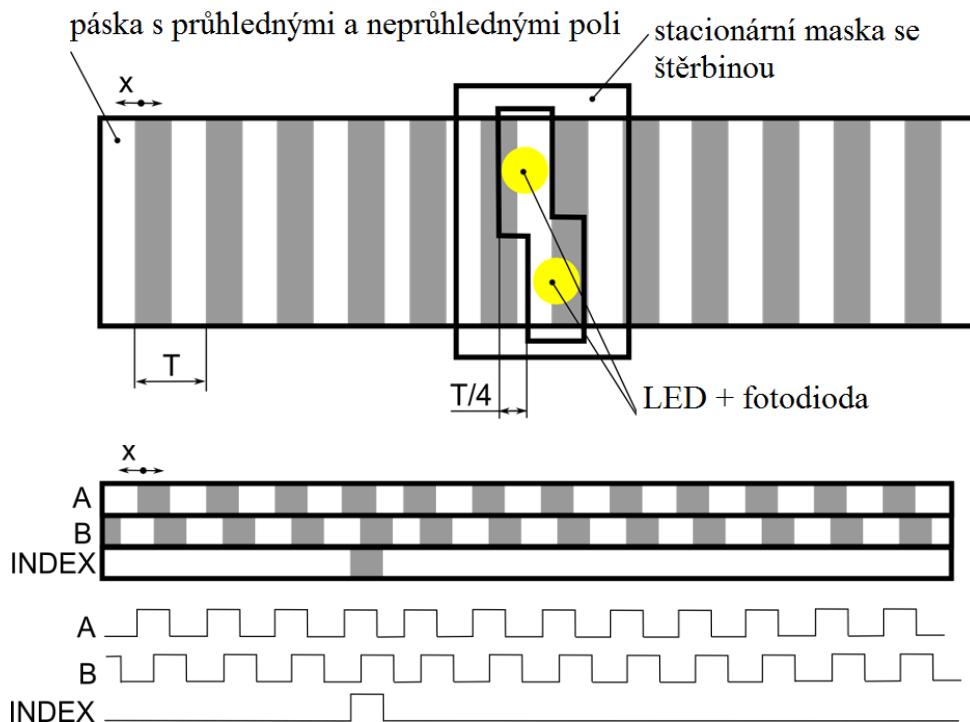
Absolutní enkodéry na druhou stranu v podobě několika bitového záznamu jasně poskytují informaci o aktuální poloze, a to jak bezprostředně po zapnutí zařízení, tak při výpadku proudu. V minulosti byl mezi těmito dvěma přístupy výrazný cenový rozdíl, především protože se v průmyslu často používaly absolutní senzory na fyzikálním principu změny odporu. V poslední době dochází ke stále častějšímu použití absolutních enkodérů. Důvodů je hned několik. Díky aplikaci bezkontaktního (optického,

magnetického, indukčního atd.) snímání došlo ke snížení nároků na údržbu a zároveň k jejich zlevnění [3] [4]. Další změna nastala čím dál častější integrací softwarů pro správu chodu závodu nebo získáváním diagnostických dat pro analýzu stavu zařízení. Mnoho absolutních sensorů může měnit své parametry v závislosti na aktuální potřebě (změna nulového bodu, vnitřní diagnostika pro prevenci selhání) [4].

### 2.3 Inkrementální / relativní měření

Jak již bylo popsáno výše, inkrementální měření udává změnu polohy. Princip takového měření může být realizovaný různými způsoby. Příslušná elektronika může v senzoru počítat počet proběhlých pulzů. Při jasně stanovené vzdálenosti odpovídající jednomu pulzu poté jejich sečtením získáme výslednou změnu polohy. Samotné sčítání pulzů ovšem není dostačující, neposkytuje totiž informaci o směru pohybu. Tento zásadní problém se řeší připojením dalšího kanálu vysílajícího pulzy posunuté vůči prvnímu kanálu. Obr. 2 na příkladu lineárního optického enkodéru názorně ukazuje, jak může taková realizace inkrementálního měření vypadat. Vidíme zde dvě fotodiody, jejichž pozice je posunutá o čtvrtinu šířky průhledných a neprůhledných polí. Z těchto fotodiód poté sledujeme výstupy A a B, přičemž jestliže A předbíhá B, tak probíhá pohyb doleva, a naopak když B předbíhá A, tak sledujeme pohyb doprava [5], [6].

Stejný způsob měření můžeme samozřejmě uplatnit i u zaznamenávání změny úhlu. V tomto případě jsme pozorovali digitální výstup v podobě binárních hodnot 0 a 1, respektive nízké a vysoké napětí.

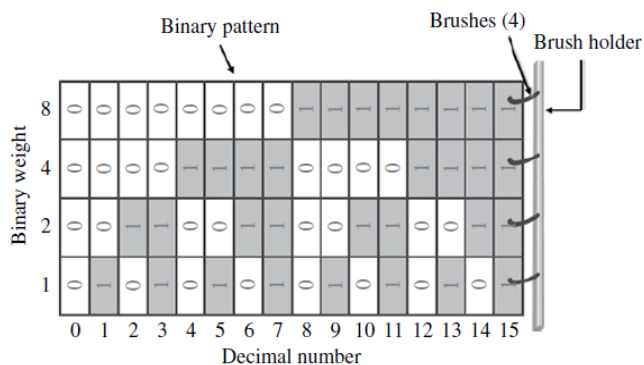


Obr. 2 Demonstrace principu inkrementálního měření [6]

## 2.4 Absolutní měření

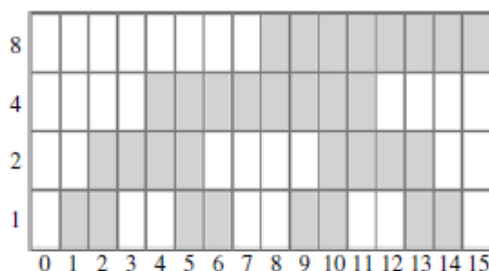
Pro každou polohu enkodéru dostaneme výstup s unikátní hodnotou o přesnosti rozlišovací schopnosti daného zařízení. Je nutné si uvědomit, že tato absolutní souřadnice je zakódovaná po délce pravítka nebo po obvodu disku. Rozlišení je dáno šířkou každého jednoho kroku. Jedním ze způsobů, jak zakódovat polohu, je pomocí binární soustavy [4].

První absolutní enkodéry polohy byly vyrobeny z nevodivé desky, na které byla rozmístěna vodivá kovová políčka s napětím obvykle +3,5 V nebo 5 V DC. Přejížděl přes ně kartáčový sběrač načítající aktuální binární kód. Časem se to ukázalo jako dost nepraktické řešení. Spolehlivost takového zařízení se postupně snižovala, protože otěrem se opotřebovávaly kartáče i kovová vrstva. Na Obr. 3 názorně vidíme, jak na levém okraji nejsou žádná vodivá políčka - 0000 v binární soustavě představuje v 0. Druhá poloha zleva je 0001, což odpovídá 1. Na ukázce tedy vidíme čtyřbitový enkodér. V praxi poskytuje pouze  $2^4 = 16$  pozic a takové rozlišení by bylo nedostačující. V dnešní době se můžeme setkat s alespoň 8bitovými (256 pozic) [2].



Obr. 3 Historický absolutní enkodér [2]

Binární zápis není nejideálnějším způsobem, jak konvertovat decimální soustavu do nul a jedniček. Problematické jsou především situace, kdy se mezi dvěma polohami mění stavy u více bitů zároveň. Na naší názorné ukázce historického enkodéru tato situace nastává například mezi sedmičkou a osmičkou. Pro bezpečnější provoz se používají takzvané Grayovy kódy, u nichž je mezi sousedními pozicemi rozdíl vždy pouze v jednom bitu. Na Obr. 4 vidíme tu samou destičku, pouze s převodem mezi binární a decimální soustavou pomocí Grayova kódu [2].



Obr. 4 Aplikace Grayova kódu na lineárním enkodéru [2]

### 3 Fyzikální principy absolutního odměřování

V této kapitole se budeme soustředit spíše na absolutní snímače ve smyslu převodníků energie. V dnešní době se některé z nich používají i kombinují při konstrukci moderních enkodérů.

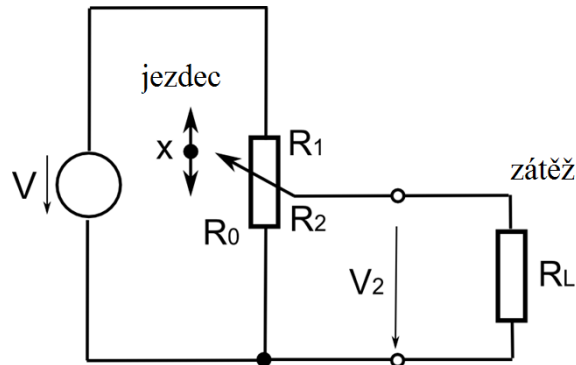
#### 3.1 Odporové

Jedná se o způsob vhodný pro získávání úhlové i lineární pozice. Je relativně jednoduché pochopit princip jeho fungování a představuje nenákladné řešení [5].

Odporové snímání polohy si můžeme představit jako jezdce proměnného odporu, přičemž jeho polohu zaznamenáváme přímou úměrou změny napětí. Takovému snímači odpovídá elektrické schéma na Obr. 5. Senzor napájíme zdrojem napětí  $V$  a polohu

získáme odečtením napětí  $V_2$ , které je proporcionální vůči změně polohy jezdce. Pro napětí  $V_2$  platí [3], [6].

$$V_2 = \frac{\frac{R_L R_2}{R_L + R_2}}{\frac{R_L R_2}{R_L + R_2} + R_1} \cdot V = \frac{R_L R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L} \cdot V \quad (1)$$



Obr. 5 Elektrické schéma modelující funkci odporového snímače [6]

Jezdec při pohybu po proměnném odporu dělí maximální odpor  $R_0$  na  $R_1$  a  $R_2$ . Jejich hodnoty se řídí podle následujících rovnic:

$$R_2 = x \cdot R_0 \quad (2)$$

$$R_0 = R_1 + R_2 \quad (3)$$

$$R_1 = R_0 - R_2 = R_0 - x \quad (4)$$

Nyní je vhodné definovat pro senzor bezrozměrnou konstantu  $k$ , která je závislá na poměru  $R_L$  a  $R_0$ .

$$k = \frac{R_L}{R_0} \quad (5)$$

Pro výstupní napětí  $V_2$  vložení konstanty  $k$  platí:

$$V_2 = V \cdot \frac{k \cdot x}{(1 - x) \cdot x + k} \quad (6)$$

Vztah mezi výstupním napětím a polohou jezdce je tedy nelineární.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k \cdot x}{(1 - x) \cdot x + k} = x \quad (7)$$

Limita konstanty  $k$  v nekonečnu nám napovídá, že při nekonečně velké hodnotě zátěže  $R_L$  získáme lineární závislost mezi napětím a polohou jezdce. V praxi je samozřejmě nemožné dosáhnout nekonečného odporu na měřicím přístroji. Vysoké hodnoty  $R_L$  ovšem poskytují přiblížení lineárnímu průběhu [3], [6].

Relativní chybu definujeme jako odečtení opravdové naměřené hodnoty od ideálního linearizovaného napětí [6].

$$\begin{aligned} \delta[\%] &= \frac{V_2 - x \cdot V}{V_2} \cdot 100 = \frac{V \cdot \frac{k \cdot x}{(1-x) \cdot x + k} - x \cdot V}{V} \\ &= \frac{-(1-x)x^2}{(1+x) \cdot x + k} \cdot 100 \end{aligned} \quad (8)$$

Relativní chyba tedy vždy nabývá záporných hodnot, protože odečteme vždy menší napětí, než jaké bychom odečetli při použití nekonečného odporu. První derivace relativní chyby položená vůči nule indikuje lokální maxima a minima. Tímto způsobem lze zjistit, zda je v celé délce nějaké místo, kde dosahuje relativní chyba maximální hodnoty. Poloha, při které je relativní chyba největší, se u lineárního odporového snímače nachází v polovině rozsahu [6].

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = 0 \rightarrow x = \frac{1}{2} \quad (9)$$

Absolutní chybu definujeme obdobně jako tu relativní.

$$\Delta[V] = \frac{k \cdot x}{(1-x) \cdot x + k} \cdot V - x \cdot V \quad (10)$$

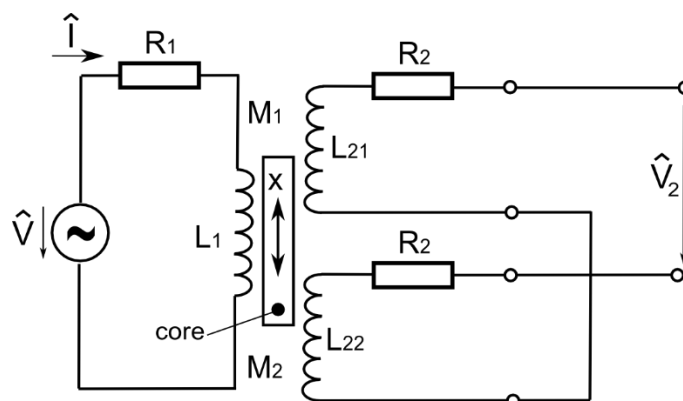
V praxi se uplatňují různá provedení odporového snímání polohy. Velice robustním řešením je použití odporového drátu navinutého do tvaru cívky na nevodivém jádru. Není ovšem překvapením, že tento typ je limitovaný tloušťkou namotaného odporového drátu. Ta standardně umožňuje rozlišovací schopnost senzoru na 0,1 % z rozsahu. Nevýhodou je také udržování dobrého kontaktu mezi jezdce a drátem při dlouhodobém nepoužívání. Dalšími použitými materiály mohou být vrstva uhlíku, vodivý plast, nebo kompozitní materiál Cermet (kombinace kovu a keramiky) s dobrou teplotní odolností. Oproti drátovému provedení je jejich výhodou plynulý růst odporu a tím pádem i detailnější rozlišení [5].

## 3.2 Indukční

### 3.2.1 LVDT

Nejpoužívanější absolutní snímače polohy využívající změny indukce jsou označovány zkratkou LVDT vycházející z anglických slov Linear Variable Differential Transformer, což se dá volným překladem označit jako Lineární proměnný diferenciální transformátor. Jeho hlavní výhodou je bezkontaktní provoz a potenciálně vysoká až nekonečná rozlišovací schopnost [2].

Skládá se ze tří a více cívek, jež mají společné pohyblivé jádro. Obr. 6 všeobecně prezentuje, jak vypadá zapojení jednotlivých komponent LVDT. Primární vinutí s označením  $L_1$  je připojeno ke zdroji střídavého napětí. Dvě sekundární vinutí mají obě stejný počet závitů a jsou zapojena v anti-sérii (za sebou, ale každý obráceně vůči sobě). Průchod střídavého proudu primární cívkou vytváří magnetické pole, které se v závislosti na poloze jádra indukuje na sekundárním vinutí napětí, jež měříme voltmetrem  $V_2$ . [3], [6].

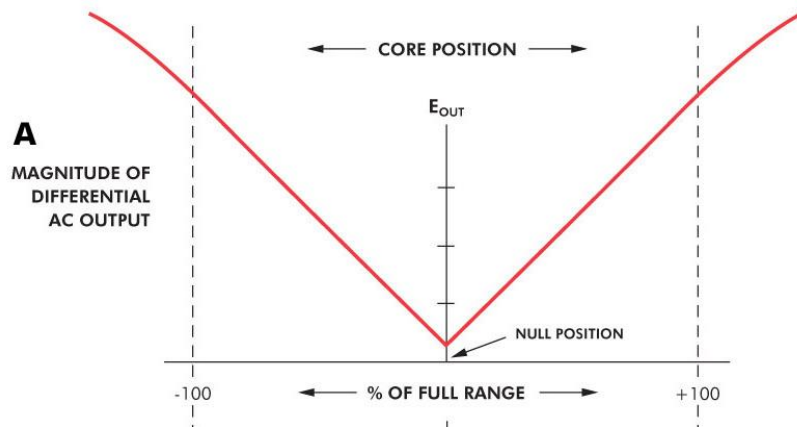


Obr. 6 Elektrické schéma LVDT senzoru [6]

Běžně se frekvence napájecího napětí pohybuje mezi 1 do 10kHz, ovšem existují i zařízení fungující na 60Hz. Obecně jsou však nízké operační frekvence nežádoucí z důvodu pomalejší odezvy na změnu polohy. LVDT se s výhodou používá v uzavřených řídicích obvodech, kde je samozřejmě rychlá odezva senzoru nutně žádanou vlastností. Při vysokých frekvencích však dochází k zesílení vlivu vířivých proudů, které mohou zapříčinit snížení výstupního signálu, zvýšení ztrát elektrické energie i zhoršení citlivosti vůči teplotním změnám [5].

Pro LVDT senzory je charakteristická statická charakteristika ve tvaru V, kde z nulové pozice vycházejí přímkami se stejnou absolutní hodnotou směrnice, protože sekundární vinutí mají obě stejný počet závitů. Nulová pozice označená na Obr. 7 jako „NULL

POSITION“ indikuje nenulovou hodnotu napětí. Tento efekt způsobují rozptylové magnetické toky a kapacitní vazba vyvolávající disipaci energie. [6] Vzhledem k tomu, že se v celém rozsahu od -100% do +100% nejedná o lineární závislost, je nutná elektronika zpracující signál do použitelné podoby [5].



Obr. 7 Statická charakteristika LVDT senzoru [6]

Díky bezkontaktnímu fungování přenosu indukčnosti mezi primárním a sekundárním vnutím, nedochází k degeneraci materiálu vlivem častého využívání. Samozřejmě je potřeba mechanicky zajistit sousost pohybujícího se jádra vůči osám cívek, což je zajištěno návrhem vhodných ložisek. Opotřebením těchto ložisek ovšem nepředstavuje ohrožení přesnosti měření. Limitujícím faktorem pro získání nekonečného rozlišení je vliv šumu a charakteristiky elektroniky, která zpracovává výstupní signál. Fyzikální princip funkce LVDT snímače sebou nese výhody, jež ho předurčují k početnému množství nejrůznějších využití [5].

### 3.2.2 Resolver

Resolver využívá stejného fyzikálního jevu jako je to u LVDT, tzn. indukování napětí na sekundární cívice transformátoru. Jeho konstrukce je ovšem navržena tak, aby snímal změny úhlu. Jedná se tedy o úhlový snímač polohy, který je absolutní pouze v rozsahu jedné otáčky. [2] Dle Obr. 8 je zřejmé, že primární vinutí s budícím střídavým proudem je navinuté na rotoru resolveru, přičemž dvě sekundární vinutí na statoru jsou vůči sobě posunutá o 90°. V principu tedy připomíná elektrický stroj [6].

Napájení střídavým napětím na primáru:

$$\hat{V} = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

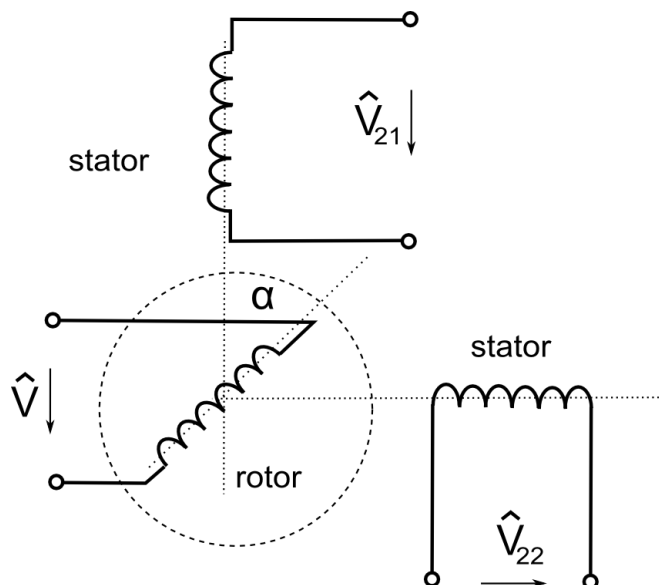
Indukované napětí na sekundáru:

$$\hat{V}_{21} = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\alpha) \quad (12)$$



$$\hat{V}_{22} = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\alpha) \quad (13)$$

Jestliže tedy provedeme demodulaci signálu na výstupu resolveru, získáme dvě hodnoty sinu a cosinu, ze kterých můžeme jasně odečíst patřičný úhel [3].



Obr. 8 Princip fungování resolveru [6]

### 3.3 Magnetické

Bezkontaktní snímání je s výhodou využíváno pro aplikace v nepříznivých podmínkách. Především jde o vzdorování vůči působení chemikálií, vysokým/nízkým teplotám a vibracím. V této kapitole se podíváme na dva odlišné magnetické jevy používané v enkodérech [2].

#### 3.3.1 Hallův jev

Uvnitř magnetického pole dochází ke změně nábojů po bočních stranách polovodičové destičky, kterou prochází proud. Jedná se o fyzikální projev Lorentzovy síly. [20] Hodnotu napětí mezi hranami destičky popisuje rovnice [3]:

$$V_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \quad (14)$$

, kde

$V_H$  ... napětí od Hallova jevu [V]

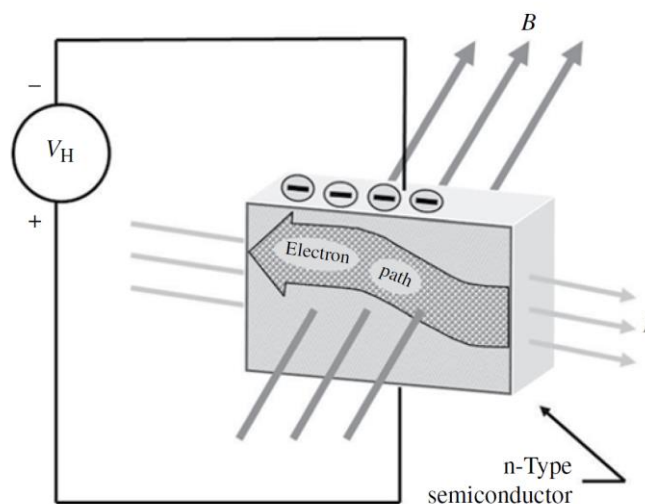
$R_H$  ... Hallova konstanta závislá na materiálu [ $m^3 A^{-1} s^{-1}$ ]

$I$  ...protékající proud[A]

$B$  ...magnetická indukce pole[T]

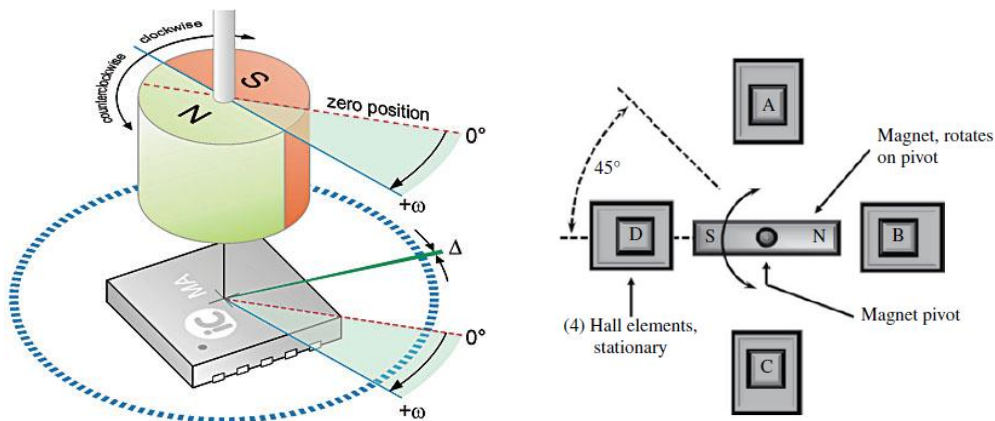
$d$  ...tloušťka destičky[m]

Zařízení využívající Hallův jev se nazývá Hallova sonda. Enkodéry založené na Hallově jevu dosáhli postupným vývojem do formy integrovaných obvodů s malými rozměry a nízkou hmotností [3].



Obr. 9 Demonstrace Hallova jevu [2]

Samotné zařízení využívající Hallův jev se nazývá Hallova sonda a dá se využít při měření vzdálenosti i úhlu. Vzhledem k trvanlivosti sondy a její odolnosti vůči vnějším vlivům si našla dobré uplatnění v automobilovém průmyslu. Při měření délkové pozice umožňuje jedna samotná sonda relativně malý maximální rozsah 25 mm. V praxi se však osvědčilo nastavení i několika desítek sond za sebou, což rozsah zvýšilo na úkor nízké ceny [5]. Při použití více halových sond můžeme také realizovat měření natočení. Jak ukazuje Obr. 10, v tomto případě se opět jedná o absolutní senzor v rozsahu jedné otáčky. Jak ovšem vyplývá z ukázek běžně dostupných enkodérů, tak soustavou důmyslně navržených převodů lze rozšířit absolutní odečet na mnohem více otáček.

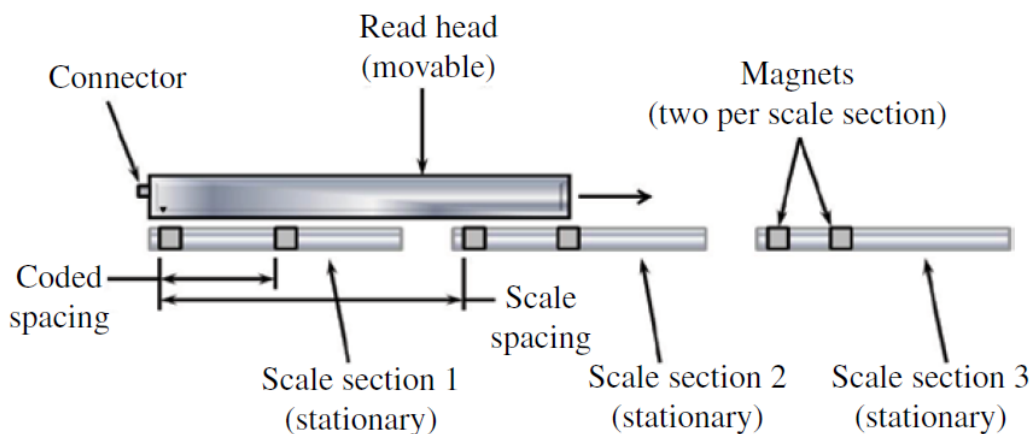


Obr. 10 Aplikace Hallova jevu při měření úhlu [2]

Bezkontaktní provoz je zárukou delší trvanlivosti a odolnosti vůči vnějším vlivům, jako jsou třeba vibrace. Teoreticky se dá dosáhnout nekonečného rozlišení, protože výstupní napětí se mění plynule se změnou pozice magnetického pole. Právě díky souvislému průběhu Hallova sonda může operovat i při rychlostech blízcích se k nule, což některé enkodéry nezvládají, protože jsou omezené svým rozlišením [2].

### 3.3.2 Magnetorezistivní

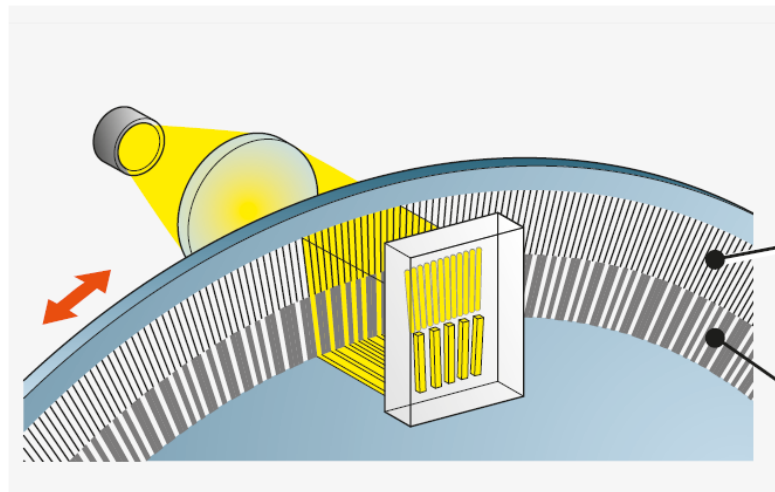
Tato metoda využívá elementu zvaného magnetorezistor, jehož odpor se mění v závislosti na síle magnetického pole jím procházejícím. Opět je rozsah jednoho jediného magnetorezistoru s jedním magnetem přibližně asi 25 mm. Proto se používá vyskládání magnetů nebo elektromagnetů do řady za sebou a bezkontaktně podél nich projíždí čtecí hlava s magnetorezistivním prvkem uvnitř. Typické provedení lineárního magnetorezistivního enkodéru může vypadat, tak že jsou dvě magnetické pásky, kde na jedné z nich se odečítá poloha inkrementálně a kde na druhé jsou po určité přesné vzdálenosti rozprostřené referenční značky. Jedná se tedy o kombinaci absolutního a inkrementálního odečítání [5].



Obr. 11 Typické provedení lineárního enkodéru s magnetorezistivními prvky [5]

### 3.4 Optické

U optických enkodérů se signál o poloze získává pomocí zdroje světla (což je v mnoha případech LED) v páru s foto tranzistorem. Počet LED a fototranzistorů stoupá s počtem bitů. Každý bit si vyžaduje alespoň jeden fototranzistor. Pomocí optických elementů (čochy, komparátory a další) se může počet LED zdrojů omezit na menší počet. Absolutní poloha je definována buď pomocí Grayova kódu, nebo pomocí binárního zápisu, jak bylo opsáno v kapitole 2. Světlo buď prochází skrz otvory, nebo jsou bitové hodnoty odlišeny odrazivým a neodrazivým materiálem [2], [8].



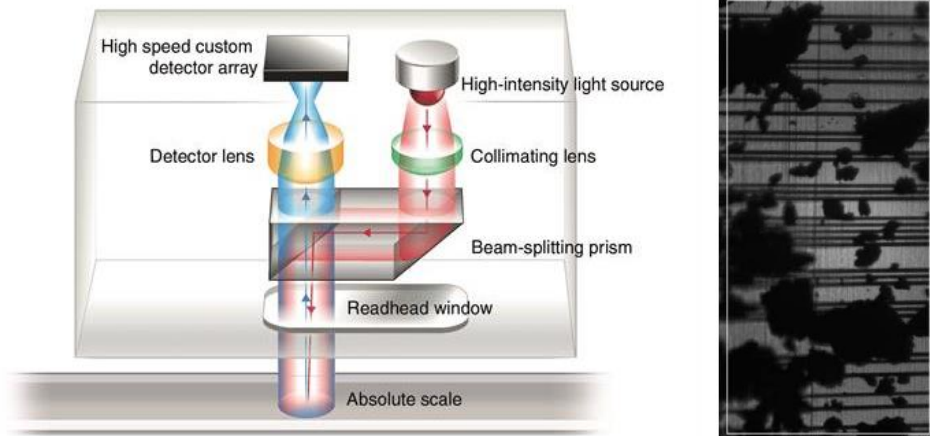
Obr. 12 Optický enkodér [7]

## 4 Výrobci

### 4.1 Renishaw

V oblasti absolutních enkodérů polohy nabízí firma Renishaw dvě řady Eolute (určena pro lineární vzdálenost) a Resolute (určená pro úhlové natočení). Obě vývojové řady těchto snímačů jsou založeny na optickém odečítání polohy z příslušného pravítka. Operují na relativně odlišném principu než ostatní konkurenční produkty. Čtecí hlava na vyžádání řídicího systému „vyfotí“ aktuální polohu na pravítku. Tam je v podobě tmavých čar na světlém podkladu jednoznačně zakódovaná absolutní souřadnice. Rozteč mezi jednotlivými zakódovanými kroky představuje 30  $\mu\text{m}$ . Obrázek je vyfocený s opravdu krátkým expozičním časem 20 ns, jehož zásluhou není problémem rozmazání fotky vlivem pohybu. Hlavní výhodou je využívání dvou nezávislých algoritmů, které zjišťují aktuální polohu. První z nich stanovuje výstup pouze na základě pořízené fotografie bez ohledu na předchozí načtené pozice. Vlivem kontaminace nečistotami ovšem hrozí problémy s čitelností. Pro analýzu používá algoritmus 65bitovou informaci, přičemž pro jednoznačnost unikátní polohy stačí čtvrtina a zbytek nadbytečných bitů slouží pro kontrolu. Druhý algoritmus interpoluje, kde by se měla čtecí hlava nacházet na základě

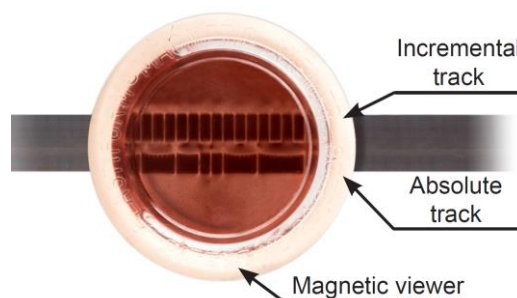
dvou předchozích čtení a konstantní rychlosti. Určitou chybu do tohoto způsobu vyhodnocování vnáší frekvence, s jakou probíhají jednotlivá čtení, a zrychlení, kterému hlava může v ten moment podléhat. Nejnižší frekvence, s jakou Evolute&Revolute čte, je 13kHz. I při poměrně vysokém zrychlení  $100 \text{ m/s}^2$  se však způsobená chyba pohybuje pouze okolo  $1,2 \text{ } \mu\text{m}$ . Pokud se při čtyřech čteních po sobě neshodují data z obou algoritmů, tak řídicí systém obdrží chybové hlášení [9].



Obr. 13 Ukázka uspořádání uvnitř čtecí hlavy Resolute & Evolute a zaznamenaný kontaminovaný snímek [9]

Renishaw dále nabízí enkodéry, jež kombinují výhody absolutního a inkrementálního odečítání. V zásadě se jedná o inkrementální pravítko, podél kterého je ovšem ještě vedena referenční páska s občasnými přerušeními. Rozteče mezi těmito referenčními značkami nikdy nenabývají stejné hodnoty. Prakticky tedy enkodéru postačuje přejet dvě tyto referenční značky, aby si z paměti dokázal najít, k jaké absolutní poloze tato rozteč patří. Jedná se o jistý kompromis, protože třeba při ztrátě elektrického napájení nemusí najíždět až do koncové polohy. Zároveň nabízejí i kombinovanou pásku s magnetorezistivními značkami, kde se také uplatňují oba přístupy.

Tato práce se ovšem zabývá přednostně absolutními měřicími systémy, tudíž se těmto hybridům již dále nebudeme věnovat.



Obr. 14 Renishaw a jeho magnetorezistivní enkodér [9]

## 4.2 TReletronic

### 4.2.1 Rotační enkodéry pro průmyslové aplikace

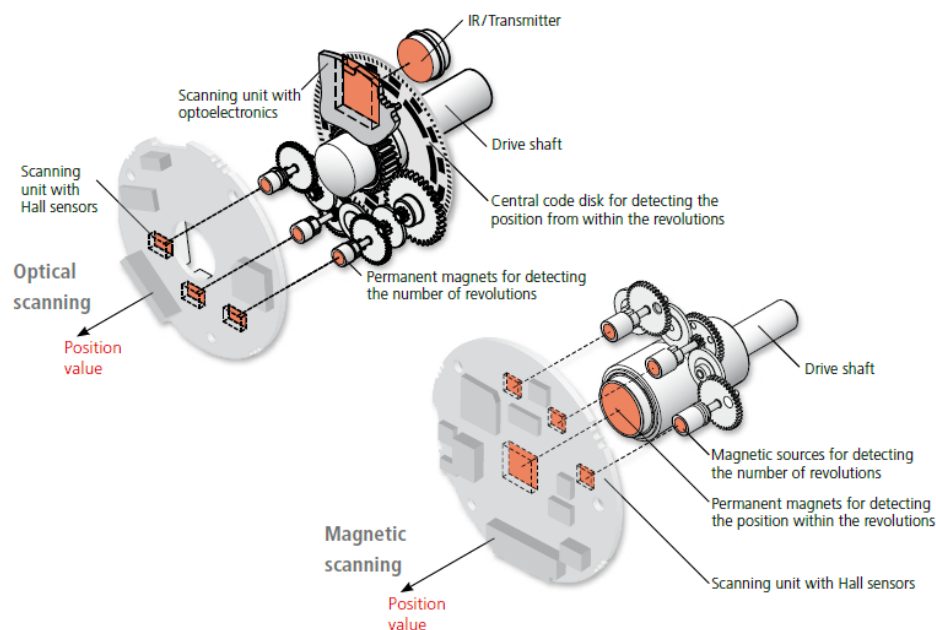
Společnost TReletronic pro své produkty využívá optického nebo magnetického skenování pozice. Aby senzor co nejlépe vyhovoval dané aplikaci, prodávají se absolutní enkodéry ve třech produktových řadách. Každá z nich adresuje jiné parametry [10].

Řada „O“ umožňuje datový výstup až s 18 bity, což představuje  $2^{18}$  (262 144) pozic pro jednu jedinou otáčku. Navíc tento výstup lze absolutně zaznamenávat až pro 4096 otoček. Tyto nevšední vlastnosti zajišťuje použití optického snímání a cílí především na aplikace vyžadující vysoké rozlišovací schopnosti.

Řada „E“ taktéž využívá optického skenování, nicméně se uplatní při standardních nárocích. Zde se pak pracuje s 15bitovým výstupem a 256 000 absolutně skenovanými otáčkami. Příslušná elektronika pak může být dodatečně nastavena dle požadovaných výstupů.

Řada „M“ nalezne své uplatnění tam, kde hlavní roli hraje výsledná cena. Počet absolutních otoček je 4096 možných. Rozlišení na otáčku je  $2^{11}$ .

Dle Obr. 13 lze vyčíst, že pro absolutní pozici na více otáček slouží jak u optického tak u magnetického čtení Hallovy sondy připevněné na sérii ozubených kol. Tímto způsobem je možné zaznamenávat absolutní polohu.



Obr. 13 Řešení optických a magnetických úhlových enkodérů TRelectronic [10]

## 5 Protokoly

### 5.1 Obecně

Některé enkodéry ve smyslu standardních průmyslových snímačů vzdálenosti a úhlu na základě geometrických vzorců mají ze svého principu samy o sobě už v digitální formě, proto pro ně není potřeba A/D převodník. Jiné si vyžadují elektroniku, jež uzpůsobí výstup pro digitální komunikaci se zařízením, které buď zaznamenává, zobrazuje, nebo dále zpracovává načtené hodnoty [3].

#### 5.1.1 Základní princip

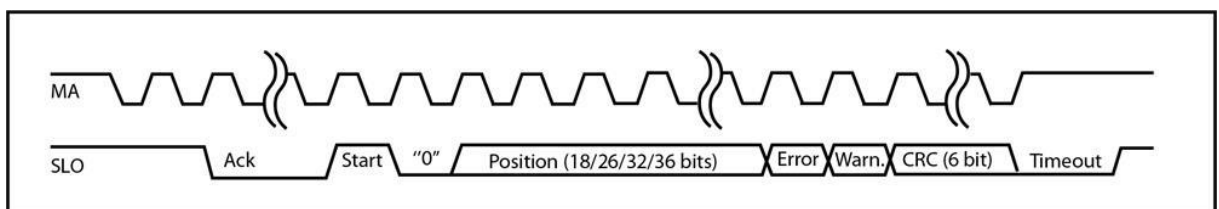
Výstup z enkodéru může být přenášen paralelní nebo sériovou komunikací. Sériová komunikace ve smyslu přenosu dat představuje posílání informace (binárního kódu) jeden bit po druhém pomocí komunikačního kanálu (vodiče). Je přímým opakem paralelní komunikace, při které dochází k přenosu více bitů zároveň na několika vodičích (například na devíti pro posílání jednoho bajtu a synchronizujících hodin). V této práci se zabývám digitální komunikací mezi senzorem a kontrolorem, jenž je realizována právě sériově / sekvenčně [4].

Každý z protokolů sériové komunikace má svá specifika v podobě možných kmitočtů, hardwarových požadavků, počtu vodičů atd. [3]. Některé firmy nabízí takzvané uzavřené protokoly. Ty představují nevýhodu v tom, že vývojáři nemají možnosti je nijak konfigurovat.

### 5.2 Otevřené protokoly

#### 5.2.1 Biss-C

Jedná se o master-slave protokol využívající sériovou komunikaci pro přenos informací o poloze. Master rozhoduje, kdy a jak rychle se budou data načítat, přičemž enkodér figuruje jako slave. Biss-C pro své fungování potřebuje dva páry vodičů, kdy jeden slouží pro přenos hodinového taktu. A druhý pár vodičů posílá požadovaná data. Data formát je definovaný, dle Obr. 14 [11].

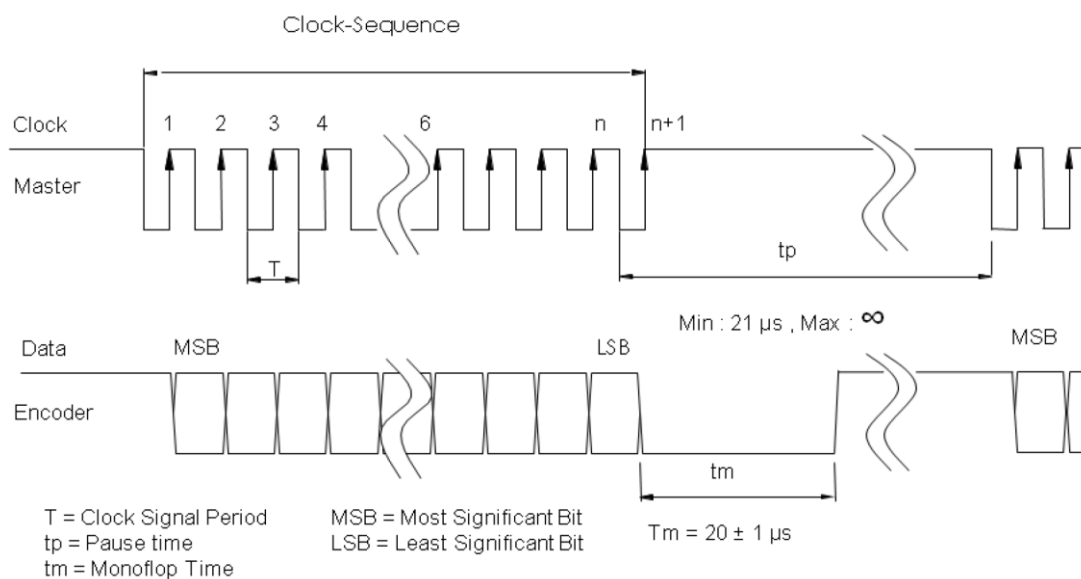


Obr. 14 Data formát protokolu BiSS-C [11]

## 5.3 Proprietární protokoly

### 5.3.1 SSI

Jedná se o digitální protokol, jenž využívá kmitočtu až 1,5 MHz. Pro jeho použití jsou potřeba také dva páry vodičů. U sériové komunikace je jeden pár použit pro hodinové impulzy a druhý pro přenos dat ze senzoru. Limitací rychlosti přenosu dat pro většinu protokolů je délka kabelu. Například pro SSI platí, že při 100 metrech kabelu je maximální možný kmitočet 300kHz a pro 200 metrů už jen 200kHz. Data formát poskytuje Obr. 15 [4], [12].



Obr. 15 SSI data formát [12]

## 6 Experimentální část

### 6.1 Heidenhain EIB 741

Výrobce Heidenhain poskytuje pro vyhodnocování dat posílaných z enkodérů externí stanici EIB 741. Obsahuje v sobě elektroniku, která přijímané signály zpracovává k dalšímu využití. Uplatnění nalezne například pro mobilní aparát na kalibraci strojů nebo vícebodovou kontrolu tolerancí na nástrojích a výrobcích. Přes Ethernet se lze také připojit k dalším vyhodnocovacím stanicím, k WLAN nebo PC. Jedna tato stanice může zároveň zpracovávat signály až ze čtyř enkodérů, a to jak sinusoidální inkrementální signály, tak digitální protokoly EnDat 2.2 nebo EnDat 2.1. V interní paměti může uchovat až 250 000 naměřených hodnot na jednu osu. Záznam lze spouštět vnitřními i externími triggerly. Pro Windows, Linux a LabVIEW je dostupný software na ovládání načítaných dat. [13], [14].





Obr. 16 Stanice EIB 741 [14]

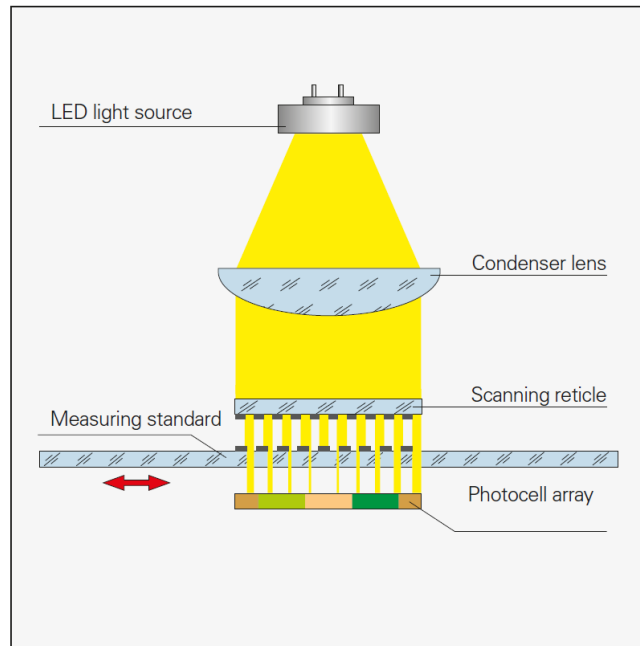
## 6.2 Heidenhain AT 1218

Pro testování byl vybrán absolutní dotykový snímač z rodiny ACANTO, podporujících protokol EnDat2.2 - Heidenhain AT 1218. Dle katalogu tento délkový kalibr operuje na 12 milimetrech s přesností  $\pm 1\mu\text{m}$ . Upotřebit se dokáže pro vstupní kontrolu obrobků, zběžnou inspekci rozměrů během produkce, kalibraci anebo při jakékoliv situaci, kdy je důležitá rychlost a spolehlivost měření. Kompaktní rozměry a relativně dlouhý rozsah je předurčuje jako ideální kandidáty pro vícebodové kontroly. Konkurenčním produktem by mohly být LVDT měřky, jež však neposkytují dlouhotrvající stálost výsledků (po delší době si žádají recalibraci). Použití ihned po zapnutí nepředchází najíždění do referenčních pozic, díky absolutnímu určování polohy [13] ,[15].

Tento snímač sice nenalezne uplatnění ve zpětnovazebných řídicích smyčkách, pro ověření fungování realizované sériové komunikace EnDat2.2 ovšem poslouží dobře.

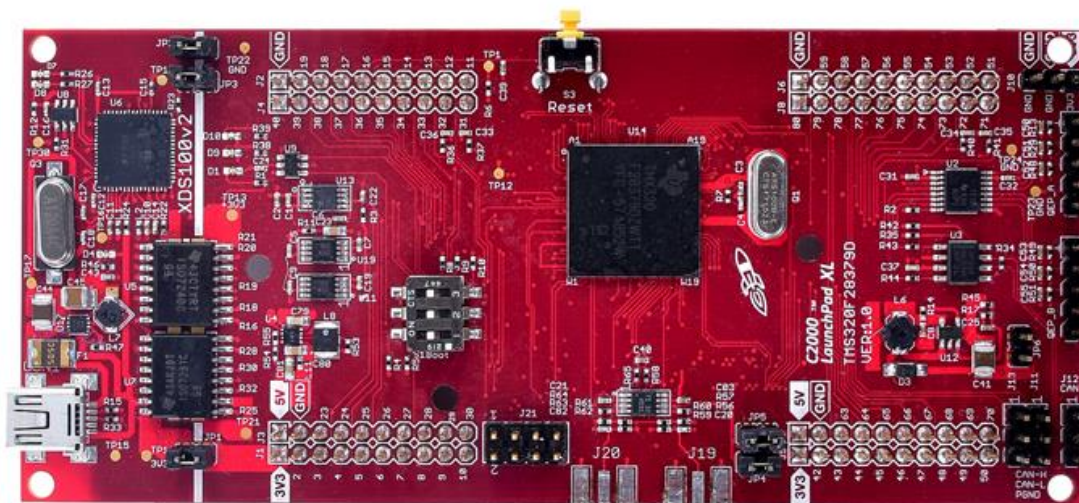
Fyzikální princip odečítání polohy je optické snímání světla na fotodiodách. K výrobě velice jemného drážkování používá Heidenhain patentovaný povrch DIADUR, což jsou extrémně tenké chromové proužky na skleněném podkladu s roztečí až  $2\mu\text{m}$  a výškou  $0,25\mu\text{m}$ . Tato povrchová úprava skleněného pravitka se především vyznačuje ostrými hranami jednotlivých drážek. Na Obr. 17 vidíme, jak z LED zdroje putuje světlo do optického členu – kondenzoru. Účel kondenzoru spočívá v soustředění procházejícího světla do rovnoběžného svazku s rovnoměrnou intenzitou. Kondenzor musí být pro tento efekt nastavený plochou stranou směrem k LED. „Usměrněný“ svazek světla putuje přes skenovací mřížku, která vytvoří tenké proužky stínu. Fotovoltaické články jsou umístěné pod pravitkem s další mřížkou, která určuje, kde přesně světlo projde [15], [16].

### Imaging principle



Obr. 17 Odečítací princip optických snímačů ACANTO [15]

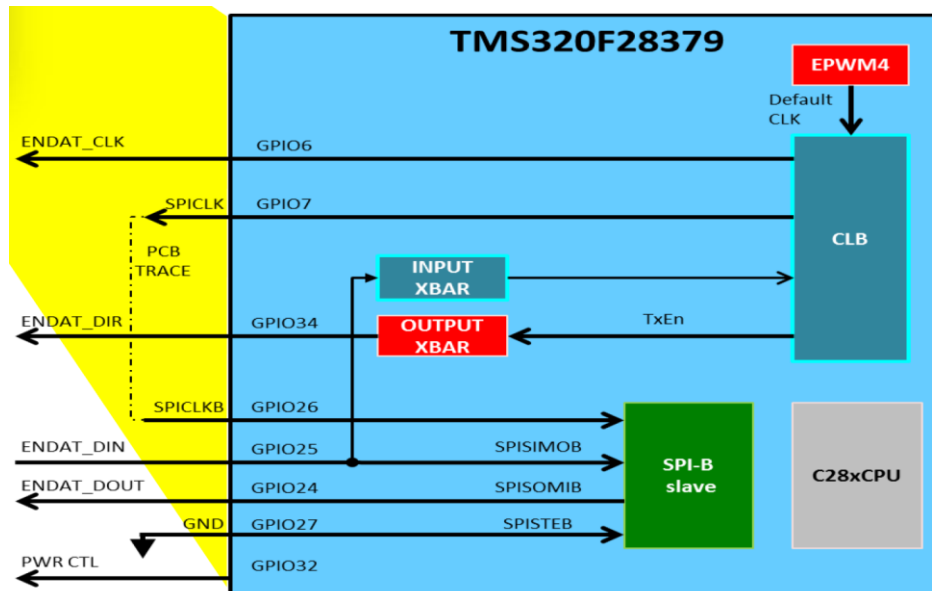
## 6.3 Texas Instruments C2000 F28379D



Obr. 19 C2000 Delfino MCUs F28379D LaunchPad Development Kit [17]

Texas Instruments nabízí návrhářům relativně levné zkušební platformy pro vývoj vysoce výkonného digitálního řízení. Tento LaunchPad je postaven na DelfinoTMS320F8379D, což je výkonný 32bitový mikrokontrolér učený pro celou škálu aplikací. Obsahuje dvojjádrové 200 MHz C28x CPU a dvojitě 200MHz koprocesory s řízením v reálném čase (CLA). 1 MB integrované flash paměti přijde vhod spolu s velkým množstvím periférií. Uplatnění může tento board najít ve zpětnovazebném řízení průmyslových motorů, zpracování signálu nebo dopravních prostředcích poháněných elektřinou [17].

Bylo by značně nepraktické rozebírat veškeré komponenty, jež jsou součástí této vývojové sady. Proto se zaměříme především na klíčové prvky nezbytně nutné pro zprovoznění sériové komunikace EnDat 2.2 s enkodérem AT1218. Obr. 18 přehledně vystihuje vztahy mezi jednotlivými členy [17].



Obr. 18 Nezbytně nutné komponenty na C2000 [17]

CBL je zkratka pro Configurable Logic Block. Tento prvek vysílá hodinový signál pro SPI a enkodér. Přesný počet pulzů a načasování zdvihu má CBL plně pod kontrolou. Instrukce, jak má pracovat, mu ovšem diktuje CPU. Dále je v CLB realizovaná funkce na kompenzaci latence způsobené délkou kabelu. Díky této funkci lze operovat při vysokých frekvencích okolo 8MHz na vzdálenosti až 100m. CBL také generuje signál ovládající směr proudění dat. Tento signál je nezbytný, aby při vyslání „mode“ příkazu poslal enkodér odpověď [17], [18].

Není překvapivá významná role procesoru - C28x CPU. V tomto případě především ovládá CBL, kde ovlivňuje parametry hodinových signálů, které každý zvlášť putují do enkodéru a SPI.

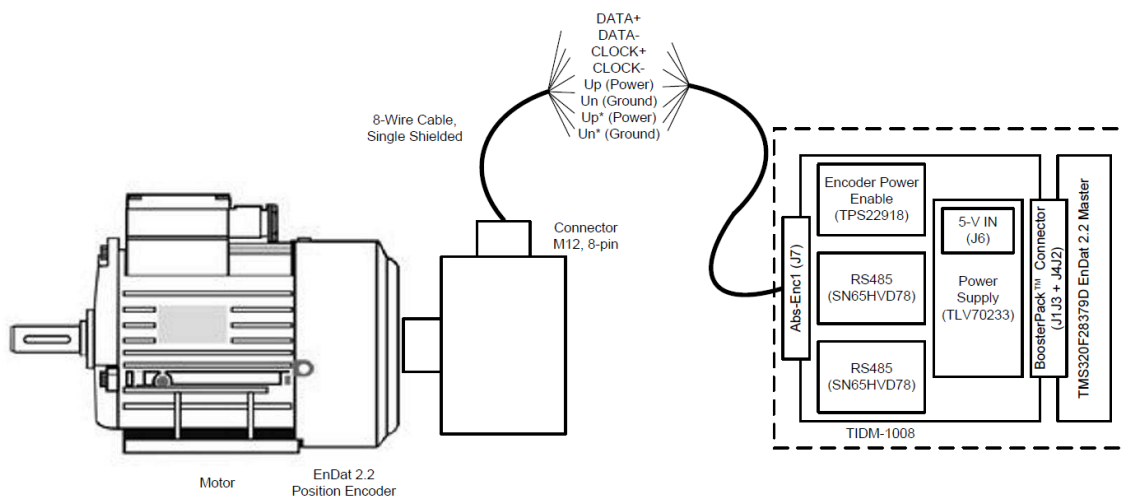
Sériové periferní rozhraní (SPI) slouží zejména pro převedení sériových dat do vhodného formátu (deserializuje data v naplněném bufferu).

Název zdroje	Typ	Účel	Omezení využití
<b>Vyhrazené zdroje</b>			
GPIO6	IO	EnDat hodiny z mastru do enkodéru	IO vyhrazené pro EnDat
GPIO7	IO	SPI hodiny generované MCU	IO vyhrazené pro EnDat
EPWM4	IO	Vnitřní účel pro generování hodin	EPWM4 vyhrazené pro EnDat
GPIO9	IO	EnDat řízení směru dat na LaunchPadu	Vyhrazené IO pro řízení směru EnDat
GPIO139	IO	Pro řízení napájení EnDat na LaunchPadu	Vyhrazené IO pro spouštění napájení
<b>Konfigurovatelné zdroje</b>			
SPI	Modul, IO		
<b>Sdílené zdroje</b>			
CPU a paměť	Modul	Kontrola CPU a použití paměti pro různé funkce	Aplikace k zajištění dostatečného přidělení CPU cyklů a paměti
Vstup XBAR	Modul, IO	Připojení k SPISMOB odpovídajícího SPI vyhrazeného pro EnDat	INPUTXBAR1 slouží k implementaci EnDat, ostatní vstupy jsou volné pro další využití
Výstup XBAR	Modul, IO	Vývod EnDat TxEn (řízení směru) signálu na GPIO9 s použitím OUTPUT6 pro výstup	OUTPUT6 slouží k implementaci EnDat, ostatní výstupy jsou volné pro další využití

Tabulka 1 Přehled použitých prvků a jejich účel

## 6.4 TIDM-1008 Reference Design

Inženýři z Texas Instruments pro své zákazníky vyvíjí referenční hardware, ke kterému poskytnou patřičnou dokumentaci potřebnou pro zhotovení. Nejedná se o hotový produkt, jež lze objednat z internetových stránek. Z dobře dostupných komponent lze vyrobit „boosterpack“ nasazující se na piny TI C2000. Funkce TIDM-1008 je fyzicky vykonávat sériovou komunikaci s enkodérem. Ze zjednodušeného schematu na Obr. 21 je jasné, že potřebujeme pouze dva RS485 vysílače, napájení enkodéru a rozhraní pro připojení kabelu. Ten se skládá z osmi vodičů, přičemž dva slouží jako CLOCK+/CLOCK-, další dva jako DATA+/DATA- a poslední dva jako napájení Up a Un [17].



Obr. 21 Schéma fungování odměřovacího systému s rozhraním EnDat 2.2 [17]

### 6.4.1 SN65HVD78

SN65HVD78 kombinuje diferenciální driver a diferenciální přijímač, které jsou vnitřně zapojeny tak, aby tvořily sběrnici vhodnou pro polo duplexní dvou vodičovou sériovou komunikaci. Stačí mu jedno 3,3V napájení [17].

### 6.4.2 TPS22918-Q1

Jedno kanálový spínač s konfigurovatelným časem zdvihu i propustí. Součástka se skládá z N-kanálového MOSFET. Řídí se „on“ a „off“ signálem.

## 6.5 DesignDRIVE Position Manager EnDat22 library

Jedná se o kompilovanou knihovnu určenou pouze pro základní funkce ovládání nejnovějších Heidenhain enkodérů přes příslušnou elektroniku. Knihovna představuje integrované MCU řešení splňující kritéria protokolu EnDat2.2 a EnDat2.1. Funkce a datová struktura knihovny umožňují vytváření nových příkazů. Součástí je CRC

algoritmus sloužící pro rozpoznání poškozených dat. Integrovaná je i kompenzace latence vlivem délky kabelu [18].

#### 6.5.1 Podporované příkazy pro EnDat 2.2

Enkodér pošle pozici s dodatečnými informacemi =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_WITH\_ADDITIONAL\_DATA

Enkodér pošle pozici a vybranou část paměti =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_AND\_SELECTION\_OF\_THE\_MEMORY\_AREA

Enkodér pošle pozici a obdrží parametry =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_AND\_RECEIVE\_PARAMETER

Enkodér pošle pozici a pošle parametry =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_AND\_SEND\_PARAMETER

Enkodér pošle pozici a obdrží testovací příkaz =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_AND\_RECEIVE\_TEST\_COMMAND

Enkodér pošle pozici a obdrží chybový reset =

ENCODER\_SEND\_POSITION\_VALUES\_AND\_RECEIVE\_ERROR\_RESET

Enkodér obdrží komunikační příkaz =

ENCODER\_RECEIVE\_COMMUNICATION\_COMMAND

#### 6.5.2 Funkce knihovny

Zde je výčet funkcí kompilované knihovny poskytnuté vývojáři z Texas Instruments. Dělí se na dva typy podle toho, kdy probíhají. V závorce je vždy uvedený počet cyklů, kolik jich musí procesor vykonat, aby byla funkce realizována [18].

##### a) Probíhající za chodu

**PM\_endat22\_setupCommand (1160 CPU Cycles)** – Připraví SPI a ostatní moduly pro vyslání daného příkazu. Všechny zápisy musí začínat tímto příkazem. Tato funkce sice nachystá potřebné periferie pro správný chod komunikace, protokol EnDat ovšem nezaznamená zatím žádnou aktivitu.

**PM\_endat22\_startOperation (46 CPU Cycles)** – Poté, co se realizuje příprava použitím předchozí funkce, tato již vykoná samotný přenos dat.

**PM\_endat22\_receiveData (500 CPU Cycles)** – Rozbaluje a zapisuje do EnDat datové struktury data získaná z enkodéru. Funkce je vyvolána, kdykoliv je SPI buffer naplněný. Následuje transformace do „rdata array“ ENDAT\_DATA\_STRUCT. V této rozbalené podobě jsou příslušně uchovávaný.

b) Probíhající při inicializaci

**PM\_endat22\_setupPeriph (8822 CPU Cycles)** – Nastavení SPI, CLB a XBAR během inicializace. Tato funkce musí být vyvolána, kdykoliv je systém resetován.

**PM\_endat22\_setFreq (220 CPU Cycles)** – Nastaví frekvenci hodinového signálu. Při inicializaci bývá obvykle frekvence nižší než při chodu.

**PM\_endat22\_getDelayCompVal (21 CPU Cycles)** – Při použití dlouhých kabelů tato funkce vypočítá, jak kompenzovat vzniklou latenci.

Programování procesoru probíhá v softwaru Code Composer Studio. Použití kompilované knihovny Position Manager může vypadat třeba jako na Obr. 19.

Below are some examples for commonly used library functions:

1. Read the position values using EnDat21 command.

```
Val = PM_endat22_setupCommand(ENCODER_SEND_POSITION_VALUES, 0, 0, 0);
PM_endat22_startOperation();
while (endat22Data.dataReady != 1) {}
Val = PM_endat22_receiveData(ENCODER_SEND_POSITION_VALUES, 0);
```

2. Read the position values using EnDat22 command.

```
Val = PM_endat22_setupCommand(ENCODER_SEND_POSITION_VALUES_AND_SELECTION_OF_THE_MEMORY_AREA,
0xA1, 0, 0);
PM_endat22_startOperation();
while (endat22Data.dataReady != 1) {}
Val = PM_endat22_receiveData(ENCODER_SEND_POSITION_VALUES_AND_SELECTION_OF_THE_MEMORY_AREA, 0)
```

3. Execute the Encoder send parameter EnDat21 command.

```
Val = PM_endat22_setupCommand(ENCODER_SEND_PARAMETER, 0xD, 0xAAAA, 0);
PM_endat22_startOperation();
while (endat22Data.dataReady != 1) {}
Val = PM_endat22_receiveData(ENCODER_SEND_PARAMETER, 0);
```

```
crc5_result1 = PM_endat22_getCrcNorm(endat22Data.address, endat22Data.data, table1);
```

4. Execute the Encoder receive parameter EnDat21 command.

```
Val = PM_endat22_setupCommand(ENCODER_RECEIVE_PARAMETER, 0x0, 0x0, 0); //data1=MRS; data2=any
PM_endat22_startOperation();
while (endat22Data.dataReady != 1) {}
Val = PM_endat22_receiveData(ENCODER_RECEIVE_PARAMETER, 0);
```

```
crc5_result1 = PM_endat22_getCrcNorm(endat22Data.address, endat22Data.data, table1);
```

Obr. 19 Často používané funkce knihovny Position Manager [18]

## 6.6 Výroba hardwaru a kódu

Výroby a vývoje hardware boosterpacku se ujal spolupracovník vedoucího práce Ing. Martina Nečase, MSc., Ph.D Jan Juránek z firmy VyvojHW.cz . Realizace proběhla modifikací referenčního designu od týmu DesignDRIVE. Technická dokumentace k hardwaru je dostupná v příloze. Tvorba kódu v Code Composer Studio pak probíhala v těsné spolupráci s vedoucím práce, který s jeho používáním má dlouholeté zkušenosti.

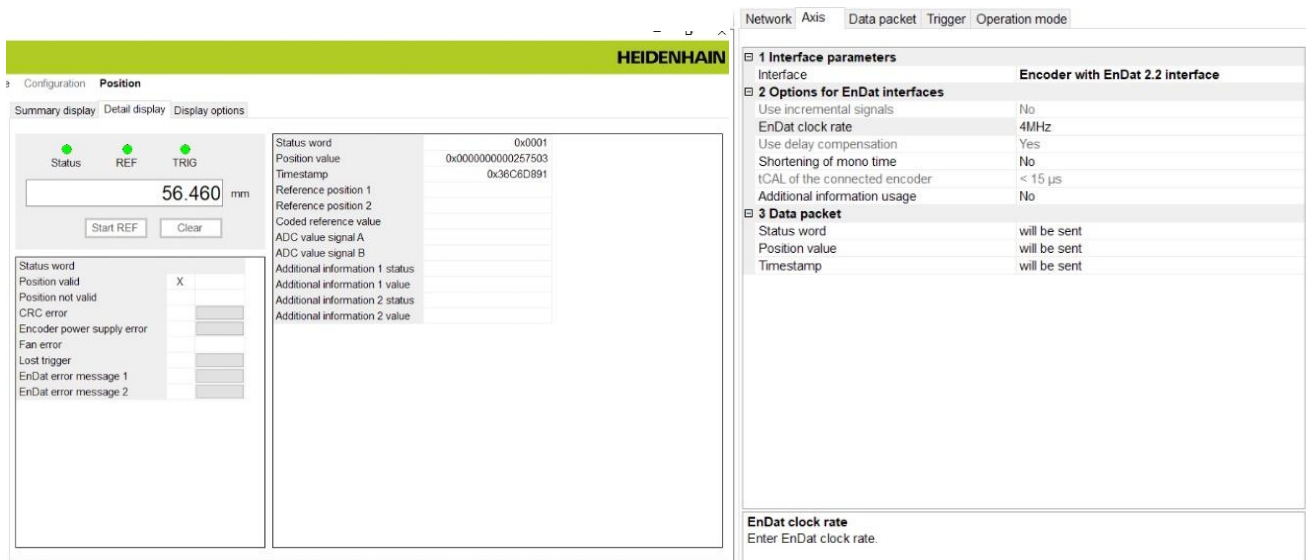
## 6.7 Testovací měření a evaluace

V laboratořích mechatroniky v prostorách fakulty strojní ČVUT v Dejvicích proběhlo testování navrženého řešení. První bylo potřeba vyzkoušet funkčnost standardního připojení se stanicí EIB 714 a softwaru dodávaného výrobcem Heidenhain. Jak je vidno na Obr. 20 a Obr.23 AT1218 se stanicí bezproblémově komunikuje a uživatelské rozhraní nabízí přehledné ovládání. Obzvláště důležité je funkce kompenzace latence a nastavení taktu hodinového signálu.



Obr. 20 Propojení s EIB 714

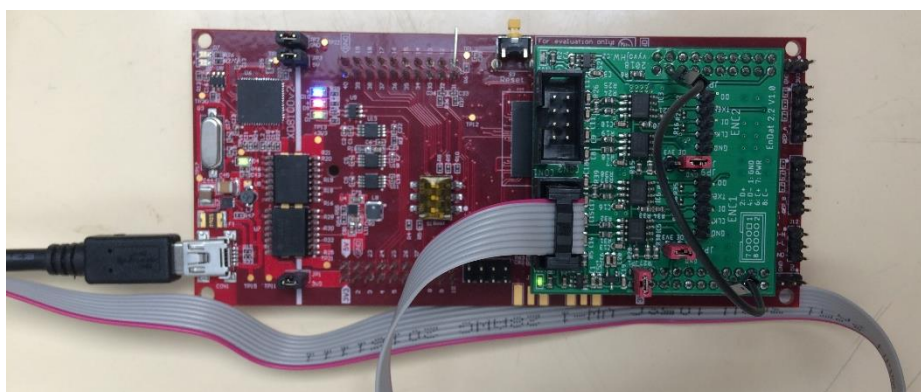




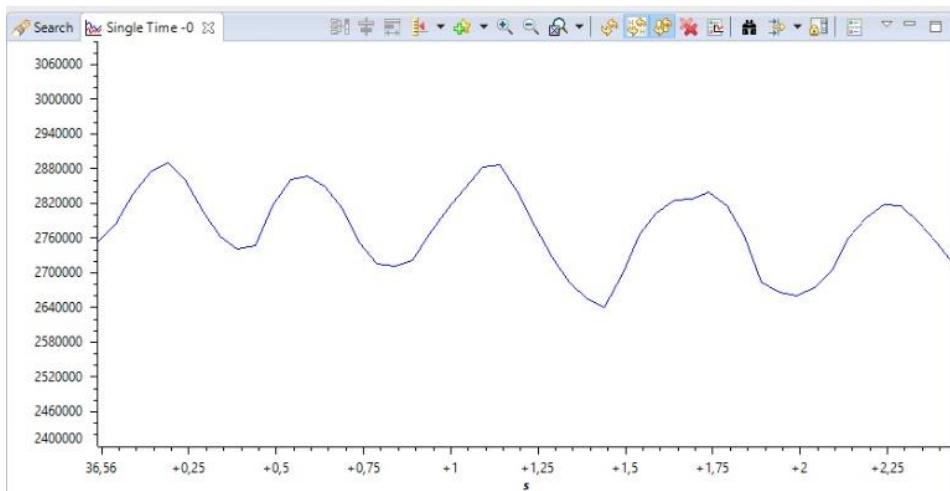
Obr. 21 Oficiální software od Heidenhain pro vyhodnocování dat

Dalším krokem bylo samotné testování na platformě Launchpad TMS320F28279D. Pro evaluaci dat jsou měřené hodnoty vykreslovány do časového grafu - Obr.23. Měření probíhalo na frekvenci 8 MHz hodinového signálu. Vidíme plynulý průběh bez výraznějších závad. Problémem však byla implementace kódu zaručující cyklický redundantní součet (CRC), který slouží pro rozpoznání poškozených dat. CRC probíhá na konci každého cyklu vyslání dat. Kontroluje, zda počet přijatých bitů odpovídá standardní formě.

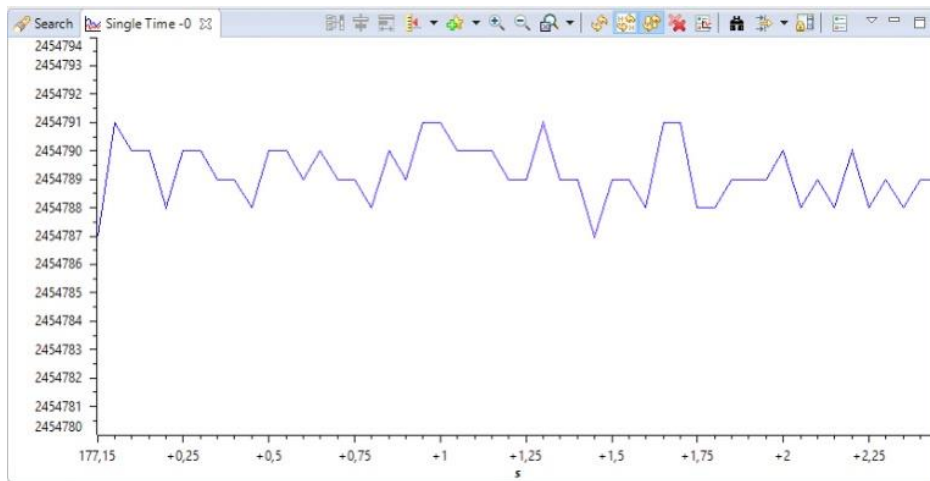
Zajímavý výstup zajisté představuje i vliv šumu na načítaná data. Obr. 24 ukazuje výkyvy v rozmezí menším než desetina mikrometru. Celkové rozlišení encoderu je ca. 500000 pulzů na 12mm.



Obr. 22 TIDM-1008 připojené na C2000



Obr. 23 Graf naměřených dat



Obr. 24 Graf vystihující v jakých hodnotách se pohybuje šum

## 7 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření propojení mikrokontroleru s absolutním snímačem polohy. Tohoto cíle bylo dosaženo, i přestože nefunguje cyklický redundantní součet. Bylo dokázáno, že modifikace referenčního designu od Texas Instruments poskytuje funkční, kompaktní a nenákladnou alternativu ke komerčnímu zařízení od firmy Heidenhain.

Tato práce také v rešeršní části poskytuje základní vhled do problematiky absolutních odměřovacích systémů.

## 8 Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1 SCHÉMA ODMĚŘOVACÍCH SYSTÉMŮ [1] .....	9
OBR. 2 DEMONSTRACE PRINCIPU INKREMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ [6] .....	11
OBR. 3 HISTORICKÝ ABSOLUTNÍ ENKODÉR [2] .....	12
OBR. 4 APLIKACE GRAYOVA KÓDU NA LINEÁRNÍM ENKODÉRU [2] .....	12
OBR. 5 ELEKTRICKÉ SCHÉMA MODELUJÍCÍ FUNKCI ODPOROVÉHO SNÍMAČE [6].....	13
OBR. 6 ELEKTRICKÉ SCHÉMA LVDT SENZORU [6].....	15
OBR. 7 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA LVDT SENZORU [6] .....	16
OBR. 8 PRINCIP FUNGOVÁNÍ RESOLVERU [6] .....	17
OBR. 9 DEMONSTRACE HALLOVA JEVU [2] .....	18
OBR. 10 APLIKACE HALLOVA JEVU PŘI MĚŘENÍ ÚHLU [2] .....	19
OBR. 11 TYPICKÉ PROVEDENÍ LINEÁRNÍHO ENKODÉRU S MAGNETOREZISTIVNÍMI PRVKY [5].....	19
OBR. 12 OPTICKÝ ENKODÉR [7] .....	20
OBR. 13 ŘEŠENÍ OPTICKÝCH A MAGNETICKÝCH ÚHLOVÝCH ENKODÉRŮ TRELECTRONIC [10] .....	22
OBR. 14 DATA FORMÁT PROTOKOLU BISS-C [11] .....	23
OBR. 15 SSI DATA FORMÁT [12].....	24
OBR. 16 STANICE EIB 741 [14].....	25
OBR. 17 ODEČÍTACÍ PRINCIP OPTICKÝCH SNÍMAČŮ ACANTO [15] .....	26
OBR. 18 NEZBYTNĚ NUTNÉ KOMPONENTY NA C2000 [17] .....	27
OBR. 19 ČASTO POUŽÍVANÉ FUNKCE KNIHOVNY POSITION MANAGER [18] .....	31
OBR. 20 PROPOJENÍ S EIB 714 .....	32
OBR. 21 OFICIÁLNÍ SOFTWARE OD HEIDENHAIN PRO VYHODNOCOVÁNÍ DAT .....	33
OBR. 22 TIDM-1008 PŘIPOJENÉ NA C2000 .....	33
OBR. 23 GRAF NAMĚŘENÝCH DAT.....	34
OBR. 24 GRAF VYSTIHUJÍCÍ V JAKÝCH HODNOTÁCH SE POHYBUJE ŠUM .....	34
TABULKA 1 PŘEHLED POUŽITÝCH PRVKŮ A JEJICH ÚČEL .....	28

## 9 Seznam použité literatury

- [1] D.G.ALCIATORE, M.B.HISTAND, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, McGraw-Hill, 2012, ISBN 978-0-07-338023-0
- [2] D.S.NYCE, *Position sensors*, John Wiley & Sons, V New Jersey 2016, ISBN 978111969089
- [3] P.RIPKA, A.TIPEK, *Master Book on Sensors*, ČVUT, V Praze 2013, ISBN 80-7300-128-2
- [4] *Encoder Communications Handbook: A reference guide for understanding the basics of encoder communications*, Dynapar, 2007, P/N#ECH150 (10/07). Dostupné z: <https://www.dynapar.com/hubfs/uploadedFiles/Downloads/Encoder%20Communications%20Hanbook.pdf>
- [5] D.S.NYCE, *Linear Position Sensors*, John Wiley & Sons, V New Jersey 2004, ISBN 0-471-23326-9
- [6] M.NOVÁK, *Technická měření*, ČVUT, V Praze 2018, ISBN 978-80-01-06388-0
- [7] *Encoders for Servo Drivers*, Dr. Johannes Heidenhain, 11/2017, 208922-21. Dostupné z: [https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/208922-21\\_Encoders-for-Servo-Drives\\_en.pdf](https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/208922-21_Encoders-for-Servo-Drives_en.pdf)
- [8] T.YOSHIZAWA a spol., *Handbook Of Optical Metrology*, Taylor & Francis Group, V Boca Raton 2009, ISBN 978-0-8493-3760-4
- [9] *Safety first –the position dermination and checking algorithms of the RESOLUTE*, Renishaw, 2012, Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/white-paper-examines-the-position-determination-and-checking-algorithms-of-resolute-absolute-encoder--18764>
- [10] *Absolute Rotary Encoders Overview*, TRelectronic, Dostupné z: <http://trelectronic.com/product-category/absolute-rotary-encoders>
- [11] *BiSS® C-mode (unidirectional) for EVOLUTE™ encoders*, Renishaw, 01/2016, L-9517-9665-01-A. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/en/download/data-sheet-biss-c-mode-unidirectional-for-evolute-encoders--78520>
- [12] *Implementation of SSI Master Interface: Application Note*, Posital GmbH, 11/8/2013, 10021488. Dostupné z: [https://www.posital.com/media/posital\\_media/documents/AbsoluteEncoders\\_Context\\_Technology\\_SSI\\_AppNote.pdf](https://www.posital.com/media/posital_media/documents/AbsoluteEncoders_Context_Technology_SSI_AppNote.pdf)

- [13] *Interfaces*, Dr. Johannes Heidenhain, 03/2015, 1078628-21. Dostupné z:  
[https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/1078628-21\\_Interfaces\\_en.pdf](https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/1078628-21_Interfaces_en.pdf)
- [14] *EIB 700 Series*, Dr. Johannes Heidenhain, 1/2018, 655780. Dostupné z:  
[https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/655780\\_05\\_A\\_02\\_EIB\\_700\\_en.pdf](https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/655780_05_A_02_EIB_700_en.pdf)
- [15] *Dotyková měřidla*, Dr. Johannes Heidenhain, 08/2017, 208945-83. Dostupné z:  
[https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208945-83\\_Messtaster\\_cs.pdf](https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208945-83_Messtaster_cs.pdf)
- [16] *EnDat 2.2 - Bidirectional Interface for Position Encoders*, Dr. Johannes Heidenhain, 09/2017, 383942-28. Dostupné z:  
[https://www.heidenhain.pl/fileadmin/pdb/media/img/383942-28\\_EnDat\\_2-2\\_en.pdf](https://www.heidenhain.pl/fileadmin/pdb/media/img/383942-28_EnDat_2-2_en.pdf)
- [17] *TI Designs: TIDM-1008 - EnDat 2.2 Absolute Encoder Master Interface Reference Design for C2000™ MCUs*, Texas Instruments, září 2017, TIDUDE3A. Dostupné z:  
<http://www.ti.com/lit/ug/tidude3a/tidude3a.pdf>
- [18] *C2000™ Position Manager EnDat22 Library Module*, Texas Instruments, listopad 2015, SPRUI35. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sprui35/sprui35.pdf>
- [19] *High-Precision Sine/Cosine Interpolation*, iC-Haus GmbH, 2014. Dostupné z:  
[http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en\\_High-Precision\\_Interpolation\\_140124.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf)
- [20] J. BURKE, J. F. MOYNIHAN, K. UNTERKOFLE, *Extraction of High Resolution Position Information from Sinusoidal Encoders*, Dostupné z:  
[http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/452913422000\\_sin\\_encoder.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/452913422000_sin_encoder.pdf)

## Přílohy

[F2-BP-2018-Kraevski-Kristian-priloha-hardware.pdf](#)

- Obsahuje technickou dokumentaci k hardwaru boosterpacku