

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce



**Realizace dekodéru kvadraturního signálu
v hradlovém poli**

květen 2018

Bakalant: Marek Janouch

Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblíček, Ph.D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že předložená tištěná verze bakalářské práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do KOS a že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne: 23. 5. 2018

.....

podpis

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlovi Kobrlemu, Ph.D. za metodické vedení a mnoho cenných rad při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za stálou podporu během celého studia.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janouch** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **457233**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Realizace dekodéru kvadrurního signálu v hradlovém poli

Název bakalářské práce anglicky:

Realization of the Quadrature Signal Decoder in FPGA

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku čidel rychlosti otáčení a úhlu natočení hřídele v elektrických pohonech.
2. Zvolte si inkrementální čidlo a vývojový kit s hradlovým polem, navrhnete, vyrobte (či nechte vyrobit) a oživte rozhraní mezi nimi.
3. Realizujte dekodér kvadrurního signálu v hradlovém poli.
4. Naměřené a dekodované údaje zobrazte vhodným způsobem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kafader, U.: The selection of high-precision microdrives. Maxon academy, 2007, ISBN 978-3-9520143-6-3.
- [2] Staebler, M.: TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed. Texas Instruments, 2000.
- [3] Pinker, J., Poupa, M.: Číslicové systémy a jazyk VHDL. BEN, 2009, ISBN 80-7300-198-5.
- [4] Haskell, R. E., Hanna, D. M.: Digital Design Using FPGA Boards. LBE Books, 2009, ISBN 978-0-9801337-8-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Koblre, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

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

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Pavel Koblre, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Práce pojednává o různých typech čidel rychlosti a polohy rotoru točivého stroje. Jsou zde vysvětleny jejich principy funkce a využití. Dále je v práci popsána realizace rozhraní mezi inkrementálním čidlem a navrženou vývojovou deskou. Poslední část je věnována návrhu dekodéru kvadrurního signálu v programovatelném hradlovém poli a zobrazování výstupů dekodéru na displeji vývojové desky.

Klíčová slova:

Senzory, čidla, programovatelné hradlové pole, dekodér, kvadrurní signál, inkrementální čidlo

Summary:

This bachelor thesis deals with different types of the rotary speed and position detectors. Their principles of function and application are explained here. Also the realization of the designed interface between the incremental encoder and the development board is described in this thesis. The last part is focused on the design of the quadrature signal decoder in the FPGA and the displaying of the decoder outputs on the board display.

Index terms:

Sensors, detectors, FPGA, decoder, quadrature signal, incremental encoder

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	10
1 ČIDLA ÚHLU NATOČENÍ A OTÁČEK.....	11
1.1 INDUKČNÍ ČIDLA.....	12
1.1.1 <i>Resolver</i>	12
1.1.2 <i>Selsyn</i>	14
1.1.3 <i>Indukčnostní čidlo</i>	16
1.1.4 <i>Tachodynamo</i>	16
1.1.5 <i>Tachoalternátor</i>	17
1.2 ČIDLA S HALLOVÝM GENERÁTOREM.....	18
1.3 KAPACITNÍ ČIDLA	19
1.4 OPTOELEKTRICKÁ ČIDLA	20
1.4.1 <i>Inkrementální optoelektrická čidla</i>	21
1.4.2 <i>Absolutní optoelektrická čidla</i>	23
2 NÁVRH ROZHRAŇÍ MEZI VÝVOJOVÝM KITEM A	
INKREMENTÁLNÍM ČIDLEM.....	26
3 NÁVRH DEKODÉRU KVADRATURNÍHO SIGNÁLU	29
3.1 HLAVNÍ MODUL A HIERARCHIE	29
3.2 POLOHA.....	30
3.2.1 <i>Vyhodnocování polohy</i>	31
3.3 RYCHLOST.....	34
3.4 ZOBRAZOVÁNÍ.....	37
3.4.1 <i>Převod binárních čísel na dekadická</i>	37
3.4.2 <i>Vytvoření signálů pro displej</i>	38
4 ZÁVĚR.....	41
LITERATURA	42
A PŘÍLOHA – NÁVRH ROZHRAŇÍ.....	45
A.1 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK	45
A.2 SCHÉMA ROZHRAŇÍ MEZI ČIDLEM A VÝVOJOVOU DESKOU	45
A.3 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE ROZHRAŇÍ – VRCHNÍ STRANA (TOP)	46
A.4 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE ROZHRAŇÍ – SPODNÍ STRANA (BOTTOM)	46
B PŘÍLOHA – NÁVRH DEKODÉRU (CD).....	47

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

U_m	amplituda napětí
ω	úhlová frekvence
t	čas
p	transformační poměr
θ	úhel natočení rotoru.
Ω	mechanická úhlová rychlost
e	elementární náboj
I	elektrický proud
Φ	magnetický indukční tok
B	magnetická indukce
n	rychlost otáčení v ot/min
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor, synchronní motor s permanentními magnety
SMD	Surface Mount Device, součástky určené pro povrchovou montáž na plošné spoje
log 1	logická úroveň 1
log 0	logická úroveň 0

ÚVOD

Senzory rychlosti a polohy hřídele, tedy zařízení, která zjišťují úhel natočení a úhlovou rychlost otáčení, jsou důležité pro automatizaci a centrální řízení pohonných systémů a také pro některé způsoby regulace elektrických pohonů jako například vektorovou regulaci či ventilový pohon synchronních motorů, kde jsou používány nejčastěji ke sledování polohy rotoru. Ke snímání úhlové polohy a rychlosti jsou používány nejrůznější typy čidel. [1][2] Těm nejdůležitějším z hlediska elektrických pohonů se věnuje první kapitola této práce.

Jedním z často používaných čidel je i inkrementální optoelektrické čidlo, které poskytuje informaci o poloze prostřednictvím kvadrurního signálu a referenčního impulsu. Přesně takovým čidlem je použité inkrementální čidlo v praktické části práce Larm IRC 305/3600 KA, pro které si tato práce dává za cíl realizovat dekodér, který bude jeho signály vyhodnocovat a zobrazovat. Dekodéry lze vytvořit hardwarově (pomocí hradel nebo programovatelných hradlových polí) nebo softwarově (pomocí mikroprocesorů). [3] Tato práce se zabývá návrhem dekodéru v programovatelném hradlovém poli Xilinx Spartan3E-100 CP132, které je umístěno na vývojovém kitu Digilent Basys2.

Protože k této vývojové desce nemůže být čidlo připojeno přímo kvůli jeho správnému napájení a kompatibilitě diferenciálních signálů, musí být vytvořeno rozhraní, které propojení umožní. Návrh a realizace rozhraní jsou popsány v druhé kapitole této práce.

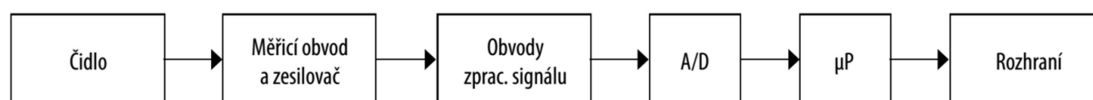
Poslední část se již zabývá návrhem logických obvodů v hradlovém poli, které zajistí správné vyhodnocení a zobrazení polohy a rychlosti. Ty jsou popsány jazykem VHDL ve vývojovém prostředí Xilinx ISE 13.2 a implementovány do konkrétního hradlového pole Spartan3E-100. Pro zobrazení hodnot a jeho ovládání jsou využity uživatelské vstupy a výstupy na vývojové desce – sedmissegmentový displej, LED, tlačítka a přepínače.

1 ČIDLA ÚHLU NATOČENÍ A OTÁČEK

Snímače rychlosti a polohy jsou snímače neelektrických veličin, které zjišťují rychlost rotačního nebo lineárního pohybu či polohu pohybující se části mechanismu. Jsou obvykle realizována tak, že fyzikální veličinu (polohu, rychlost) převádějí na elektrickou veličinu, která se následně nějakým způsobem měří. Analogová elektrická veličina je poté většinou analogově digitálním převodníkem, jenž vzorkuje a kvantuje elektrický signál, zpracovávána pomocí mikropočítače, který může komunikovat s dalšími prvky řídicího systému. Blokové schéma takového senzoru je na Obr. 1.1. Některé snímače převádí mechanickou veličinu rovnou na číslicový signál. [4]

Ekvivalentním pojmenováním snímače je také senzor či detektor.

Čidlo je citlivá část snímače, a pokud je již spojeno s obvody pro zpracování signálů a komunikaci na křemíkovém čipu, potom se jedná o tzv. inteligentní senzor. [4]



Obr. 1.1 Blokové schéma měřicího řetězce se senzorem (převzato z [4])

Čidla můžeme rozdělovat podle různých hledisek. Podle typu snímaného pohybu na:

- rotační,
- lineární.

Tato práce je zaměřena na čidla otáčení, o čidlech pro lineární pohyb tudíž pojednávat nebude.

Podle chování po připojení napájení je dělíme na čidla:

- inkrementální (přírůstková – po připojení je třeba dosáhnout určité referenční polohy, odkud čidlo začne počítat),
- absolutní (po připojení je informace o poloze ihned k dispozici).

Dále je můžeme dělit podle použitého principu na:

- čidla využívající elektromagnetickou indukci (indukční čidla),
- optoelektrická čidla,
- čidla s Hallovým generátorem,
- kapacitní čidla,

čehož je využito právě v této kapitole. Další dělení jsou možná např. podle výstupního

signálu, použití apod. [5][6]

Existují čidla, která jsou schopna detekovat pouze polohu (úhel natočení) a čidla citlivá jen na rychlost otáčení. Druhou veličinu lze získat derivací resp. integrací podle vztahu:

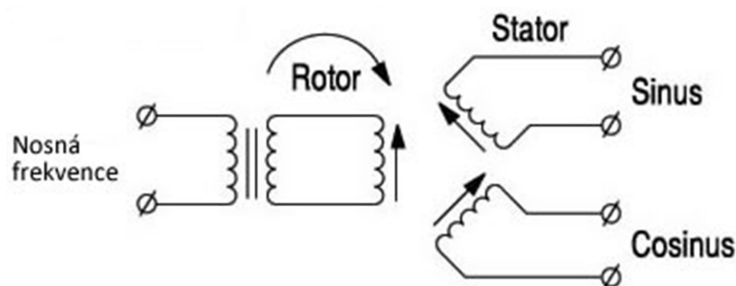
$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}. \quad (1.1)$$

1.1 Indukční čidla

Indukčních čidel je celá řada, v této práci jsou uvedena ta nejvýznamnější z hlediska elektrických pohonů.

1.1.1 Resolver

Resolver lze přirovnat k malému elektromotoru a rotačnímu transformátoru. Je založen na rozkládání mechanického úhlu natočení rotoru do kartézských (x a y) souřadnic, kdy jednu souřadnici představuje sinus tohoto úhlu, druhou cosinus. Tento stroj je tvořen dvěma vinutími na statoru a jedním vinutím na rotoru. Vinutí na statoru jsou posunuta o 90°. Na rotorové vinutí je napětí přivedeno buď přes kartáče a kroužky nebo obvykleji rotačním transformátorem (schéma na Obr. 1.2). [7][8]



Obr. 1.2 Schéma resolveru (převzato z [9])

Rotorové vinutí je napájeno napětím u_{ref} s nosnou úhlovou frekvencí ω :

$$u_{\text{ref}} = U_m \sin(\omega t), \quad (1.2)$$

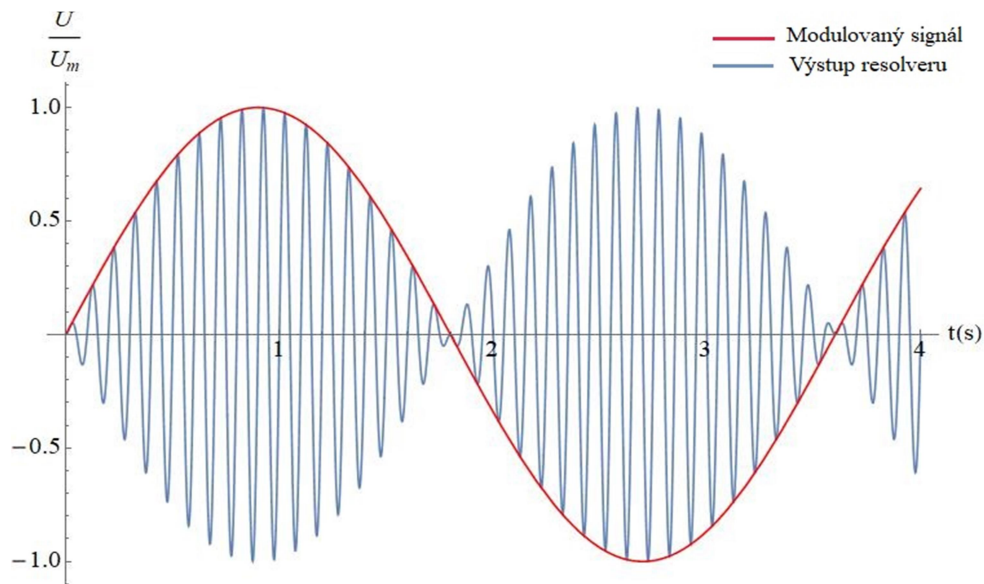
přičemž úhlová frekvence bývá volena v rozsahu 1 až 20 kHz. Proud procházející rotorovým vinutím vytváří ve stroji indukční tok, který indukuje napětí ve statorových vinutích. Tato napětí mají průběh podle aktuální polohy (úhlu natočení) rotoru vůči statoru díky změně vzájemné indukčnosti vinutí. Protože statorová vinutí jsou na sebe kolmá, bude jedno napětí násobeno sinem a druhé cosinem úhlu natočení rotoru, tedy:

$$u_{\sin} = p U_m \sin(\omega t) \sin(\theta), \quad (1.3)$$

$$u_{\cos} = p U_m \sin(\omega t) \cos(\theta), \quad (1.4)$$

kde p představuje transformační poměr, který se standardně v průmyslových aplikacích volí 0,5, tedy maximální hodnoty měřených napětí dosahují poloviny referenčního. [7][8][9][10]

Informace o poloze je tedy v obálkách měřených napětí statoru, jak je vidět na Obr. 1.3, a je k dispozici hned, jakmile je rotorové vinutí napájeno napětím u_{ref} . Jedná se tedy o absolutní čidlo polohy, což je výhodou z hlediska přesnosti určené polohy a její dostupnosti po připojení napájení. [7]



Obr. 1.3 Průběh napětí jedné fáze statorového vinutí

Mezi další výhody patří relativně malá teplotní citlivost a nízké nároky na čistotu prostředí. Tato čidla mohou být provozována i jako „bezrámová“, jelikož nevyžadují citlivé polovodičové prvky. Díky tomu je také možné přenášet neupravený signál z těchto čidel na vzdálenosti delší než 100 metrů. Další výhodou je možnost umístění resolveru přímo na měřenou hřídel bez spojky a nutnosti dalších vlastních ložisek čidla jako u citlivějších optoelektrických čidel, protože resolver nemá takové nároky na soustřednost rotoru a statoru. To umožňuje zkrácení hřídele a zlevnění celého systému, čehož se využívá především u servopohonů a vektorově řízených střídavých motorů. [8][9]

Běžně používané bezkartáčové resolversy s rotačním transformátorem mají díky mnohazávitovému sekundárnímu vinutí na rotoru poměrně vysokou impedanci, která je limituje v použití vysokých frekvencí referenčního napětí a otáček. Kvůli této

skutečnosti a také kvůli vysokým odstředivým silám, které působí na toto vinutí, jsou resolvery používány při rychlostech do 10 000 ot/min. [8]

1.1.2 Selsyn

Selsyn (nebo také synchro) je indukční stroj podobný resolveru, ale na rozdíl od něj má tři statorová vinutí posunutá o 120° a tedy i tři výstupní signály. Proto má vyšší rozlišení než resolver. Tyto signály jsou vybuzeny podobně jako u resolveru referenčním napětím rotorového vinutí. [7]

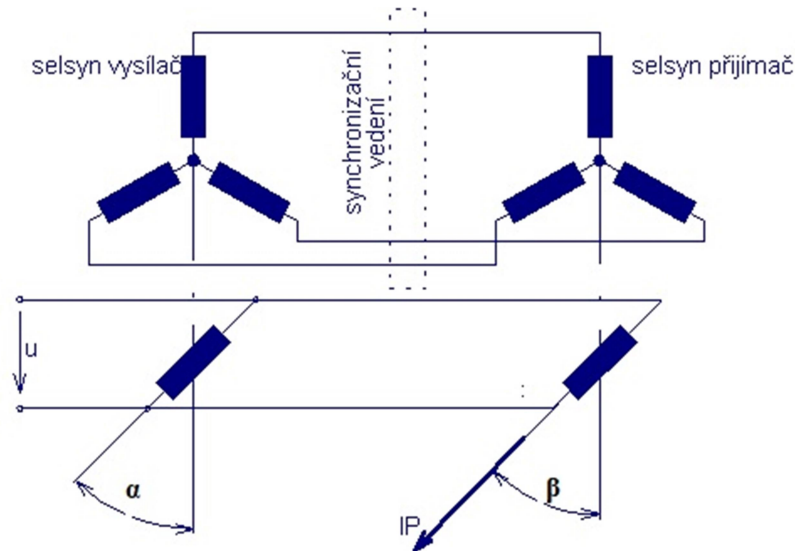
1.1.2.1 Elektrická hřídel

Pokud jsou k dispozici dva selsyny, mohou být zapojeny jako tzv. elektrická hřídel, kdy jeden selsyn funguje jako vysílač polohy a druhý jako přijímač. Rotory obou strojů jsou v tomto případě zapojeny paralelně a společně napájeny střídavým napětím. Statorová vinutí jsou propojena podobně jako rotorová, ale nejsou napájena (viz Obr. 1.4).

Pokud jsou rotory ve stejné poloze ($\alpha = \beta$), neprotéká synchronizačním vedením žádný proud. Indukovaná napětí obou selsynů jsou totiž shodná. Pokud je rotor přijímače natočen jinak než rotor vysílače ($\alpha \neq \beta$), indukovaná napětí jsou různá a synchronizačním vedením protéká proud, v selsynu přijímači vzniká jako důsledek magnetický tok a moment, který se snaží otočit s rotorem do polohy, ve které by byl synchronizační proud nulový a rotory by se tak natočily do stejné polohy.

Sledování úhlu natočení se děje s určitou chybou, která je dána zatěžováním rotoru přijímače, rychlostmi změn natočení, odpory apod. Tedy pokud chceme, aby rozdíly mezi úhly α a β byly minimální, musíme dbát na to, aby bylo zatěžování přijímače co nejmenší, potom se chyba přenosu může pohybovat i pod 1%.

Pro indikaci polohy může být k rotoru přijímače připevněna ručka indikačního přístroje (IP), jak je naznačeno na Obr. 1.4. Výhodou takového provedení je, že na jeden vysílač může být připojeno více přijímačů a indikace tak může být k dispozici na více místech. Nevýhodou je především rozlišení takového měření, které se pohybuje mezi 3 až 10 úhlovými minutami, což je pro dnešní aplikace často nedostatečné. [11][12]



Obr. 1.4 Schéma selsynu jako elektrické hřídele (upraveno z [11])

Pro přenos úhlu natočení byly selsyny používány např. na lodích jako komunikační prostředek i k řízení palby děl. Dnes se využívají k natáčení antén v radiotechnice. [9][11]

1.1.2.2 Polohový transformátor

Dva selsyny lze také využít jako polohový transformátor, v němž jsou statory zapojeny stejně jako v předchozím případě, avšak rotor selsynu vysílače je napájen harmonickým napětím:

$$u_1 = U_m \sin(\omega t) \quad (1.5)$$

a rotor přijímače je zapojen naprázdno, resp. k měřicímu přístroji. Indukované napětí rotoru je závislé na vzájemné poloze obou rotorů:

$$u_2 = U_m \sin(\omega t) \cos(\theta_2 - \theta_1), \quad (1.6)$$

kde θ_1 je úhel natočení rotoru vysílače a θ_2 je úhel natočení rotoru přijímače. Monotónní závislost mezi napětím a úhlu natočení mezi rotory

$$\alpha = (\theta_2 - \theta_1) \quad (1.7)$$

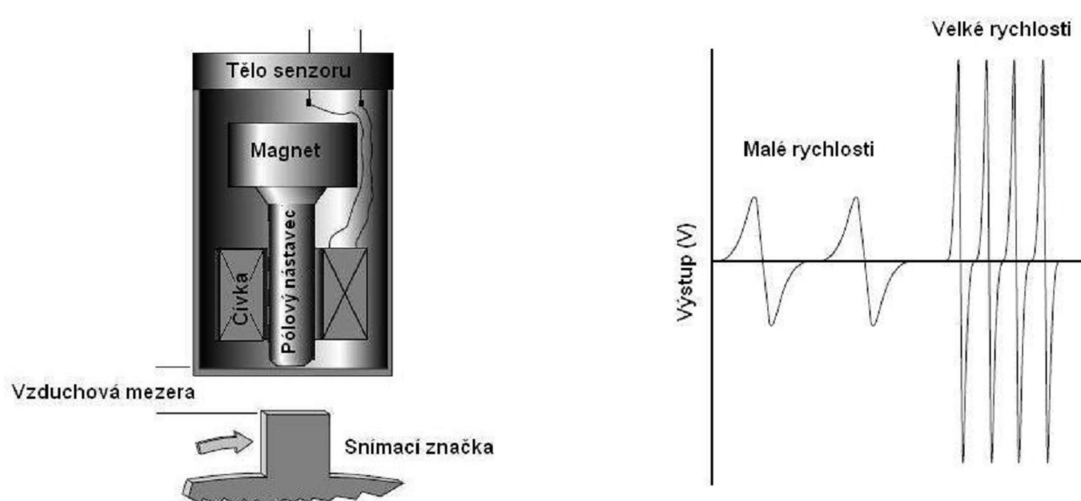
je pouze na intervalu $\alpha \in \left\langle 0, \frac{\pi}{2} \right\rangle$, což je velká nevýhoda, ale pro vyhodnocování se většinou používají fázově citlivé spínané usměrňovače, čímž se rozšíří monotónnost na interval $\alpha \in \left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$. [5][12]

1.1.3 Indukčnostní čidlo

Toto čidlo pracuje na principu změny indukčnosti při změně magnetického odporu. Ten je vyvolán otáčením kola se snímacími značkami, což jsou výstupky z magnetického materiálu, které zmenšují vzduchovou mezeru mezi kolem a čidlem, ve kterém je permanentní magnet a jádro (pólový nástavec) z feromagnetického materiálu (viz Obr. 1.5). Indukčnost je dána vztahem:

$$L = \frac{k N^2}{R_m}, \quad (1.8)$$

kde k je konstrukční konstanta, N je počet závitů cívky a R_m je magnetický odpor. [12]



Obr. 1.5 Princip indukčnostního čidla a ukázka výstupních signálů (převzato z [13])

Toto čidlo samo není schopné určit směr pohybu kola, funguje jako inkrementální.

Existují různá konstrukční provedení těchto čidel podle toho, pro jaké rychlosti je vyžadována vyšší citlivost a v jakém prostředí má být čidlo provozováno. Výsledná konstrukční konstanta je dána tvarem těla čidla i jádra. [9][13]

1.1.4 Tachodynamo

Tachodynamo je stejnosměrný elektrický stroj, který se používá k měření rychlosti otáčení. Obvykle má komutátor a buzení permanentními magnety, které vytvářejí konstantní magnetický tok. Indukované napětí na rotoru je úměrné úhlové rychlosti:

$$U_{TD} = C \Phi \omega = K_{TD} \omega, \quad (1.9)$$

kde K_{TD} je konstanta tachodynamu udávaná na štítku stroje obvykle ve V/1000 ot. Na

štítku je většinou také udáván minimální zatěžovací odpor, aby nedocházelo k velkému úbytku na vnitřním odporu vinutí tachodynamu, což by vedlo k velké chybě měření.

Výhodou tachodynamu je dobrá citlivost, ale napětí je kvůli komutaci zvlněné. Toto zvlnění má vysokofrekvenční charakter a lze jej filtrovat, naopak nesouosým upevněním tachodynamu k měřenému mechanismu vzniká nízkofrekvenční zvlnění závislé na rychlosti otáčení, které nelze filtrací potlačit. [5][14]

Tachodynamy se běžně používají do otáček 6000 ot/min u velkých motorů v průmyslu. [15][16][17]

1.1.5 Tachoalternátor

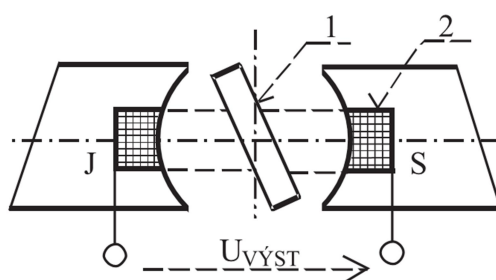
Tachoalternátory jsou střídavé stroje, které slouží jako tachodynamy k detekci rychlosti otáčení. Vyrábí se s permanentními magnety nebo s bubínkovým (klecovým) rotorem do otáček 8000 ot/min a vyznačují se dobrou linearitou v nezátíženém stavu. Používají se podobně jako tachodynamy u velkých strojů. [14][15]

Principy obou provedení jsou dále popsány zvlášť.

1.1.5.1 Tachoalternátor s permanentními magnety

Permanentní magnety mohou být umístěny na rotoru, na statoru je pak nepohyblivé vinutí (může být vícefázové), do kterého se indukují při pohybu napětí úměrné rychlosti otáčení.

Druhý případ je ten, že permanentní magnet je umístěn na statoru společně s vinutím, do kterého se indukují napětí, přičemž změnu velikosti a směru magnetického toku procházejícího cívkou obstarává feromagnetická tyč na rotoru (viz Obr. 1.6). [14]



Obr. 1.6 Tachoalternátor s permanentním magnetem na statoru (1-feromagnetická tyč, 2-nepohyblivá cívka na rotoru) (převzato z [14])

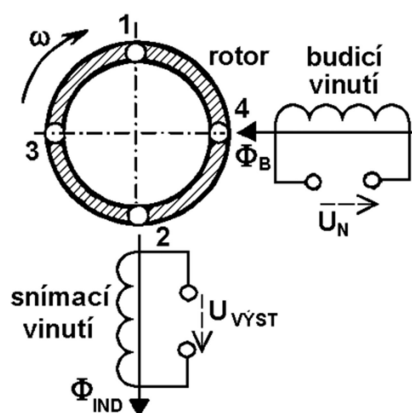
1.1.5.2 Tachoalternátor s klecovým rotorem

Toto uspořádání se skládá ze dvou vinutí na statoru posunutých vůči sobě o 90° a klecového (bubínkového) vinutí nakrátko na rotoru (viz Obr. 1.7). Budicí vinutí je

napájeno střídavým proudem, který vytváří magnetický tok. Ten indukuje napětí v rotoru. Pokud se rotor nehýbe, maximální napětí se indukuje v tyčích 1 a 2. Pokud se ale rotor pohybuje obvodovou rychlostí v , indukují se v jeho tyčích napětí podle vzorce:

$$U = B l v \sin \alpha , \quad (1.10)$$

kde l je délka tyčového vinutí rotoru a úhel α je úhel mezi vektorem rychlosti dané tyče a vektorem magnetické indukce (magnetického toku Φ_B). Maximální napětí je indukováno v tyčích 3 a 4, protože zde je $\sin \alpha$ roven jedné (vektory rychlostí tyčí 3 a 4 jsou kolmé na magnetický tok Φ_B). Rotorové vinutí je nakrátko, může jím tedy protékat proud, který vytváří magnetický tok ve směru snímací cívky, kde se indukuje napětí úměrné rychlosti otáčení, které je posléze měřeno. [14]



Obr. 1.7 Tachoalternátor s klecovým rotorem (převzato z [14])

1.2 Čidla s Hallovým generátorem

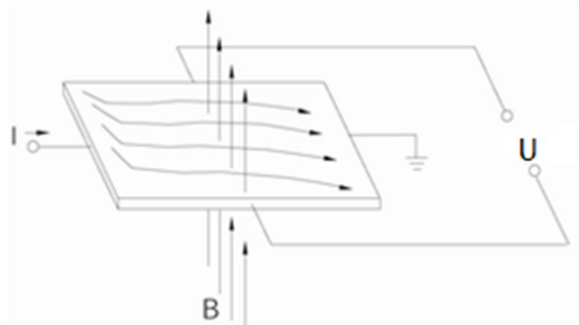
Pokud máme vodivý nebo polovodičový plech, který je v magnetickém poli, jehož siločáry jsou kolmé na rovinu plechu, a necháme jím procházet elektrický proud, generuje se v něm napětí kolmé ke směru proudu (viz Obr. 1.8). Tento vznik napětí se nazývá Hallův jev podle svého objevitele. Velikost napětí je dána mimo jiné i velikostí a kolmostí magnetické indukce, ve které je plech umístěn, proto lze tento jev aplikovat do inkrementálních čidel rychlosti a polohy, pokud se pohybem mění magnetické pole uvnitř čidla s Hallovým generátorem. Generované napětí je dáno rovnicí:

$$U_H = \frac{I B}{e N d} , \quad (1.11)$$

kde I je proud procházející plechem, B je kolmá složka magnetické indukce, e je elementární náboj, N je koncentrace nosičů náboje a d je tloušťka plechu. [7][18]

Tato čidla se dají dobře použít u motorů s permanentními magnety na rotoru jako

např. synchronních motorů s permanentními magnety (PMSM). Na stator je umístěno několik Hallových čidel podle potřebného rozlišení měřené polohy, které snímají magnetickou indukci permanentních magnetů. Hallové sondy lze také použít podobně jako indukčnostní senzory s kolem s feromagnetickými výstupky, které snižují magnetický odpor. Ty jsou sondou inkrementálně počítány. Analogové výstupy jsou následně obvykle filtrovány a zesilovány. [7][19]



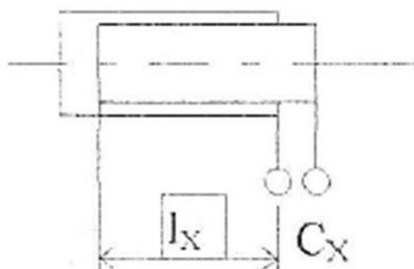
Obr. 1.8 Vysvětlení Hallova jevu (převzato z [18])

Často je výhodnější, aby čidlo pracovalo jako digitální. Toho lze docílit použitím Schmittova klopného obvodu. [7]

Výhodou těchto čidel jsou malé rozměry, neboť se vyrábí i jako integrované na jednom čipu s vyhodnocovacími obvody, poměrně nízká cena, dlouhá životnost a odolnost proti prachu a vibracím. Naopak s teplotou se může měnit výstupní napětí, které závisí na elektrickém odporu plechu a koncentraci nosičů. Nevýhodou také může být omezená maximální vzdálenost snímaného magnetu, která se udává kolem 10 cm. [7][18]

1.3 Kapacitní čidla

Tato čidla sledují změnu kapacity kondenzátoru, ta se mění s plochou a vzdáleností elektrod a permitivitou. Rozdělují se na kontaktní a bezkontaktní čidla. [10]



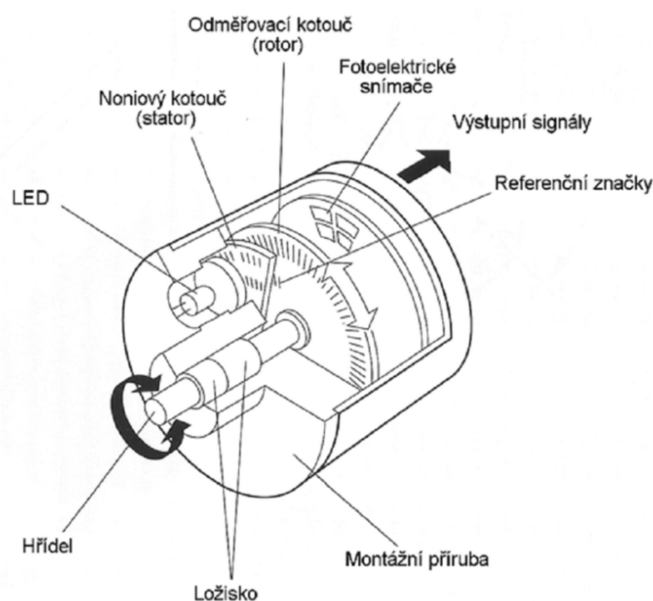
Obr. 1.9 Vzájemný posun desek kondenzátoru (l_x – délka překryvu desek, C_x – kapacita daná překryvem) ([20], upraveno)

Kontaktní čidla mají jednu elektrodu spojenou s měřeným objektem a jsou využívána také právě pro měření polohy hřídele. Jedna elektroda je připevněná k hřídeli a jedna k nepohybující se části čidla. Vzájemným pohybem elektrod se lineárně mění kapacita kondenzátoru (viz Obr. 1.9). Taková kapacitní čidla se používají k měření natočení u servopohonů. Pro různé úhlové rozsahy se vyrábějí mechanické adaptéry, které se nasazují mezi čidlo a sledovanou hřídel. [10][20][21]

Existuje velké množství různých dalších typů kapacitních čidel, která jsou využívána v průmyslu k měření např. výšky hladiny kapaliny, poloze skleněných lahví na plnicích linkách apod. [10][22]

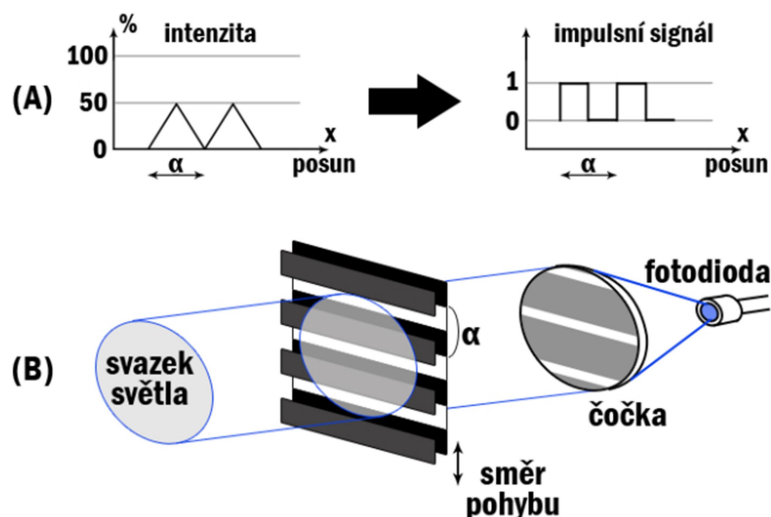
1.4 Optoelektrická čidla

Optoelektrická čidla obsahují zdroj světla (většinou LED nebo zdroj infračerveného záření), který svítí na kotouč spojený mechanicky s hřídelí. Na něm jsou kódové stopy se značkami, které propouští nebo odráží světlo na fotodetektory (většinou fotodiody). Ty převádí intenzitu záření na napětí. Kotouč bývá vyroben ze skla nebo plastu. Signály z fotodetektorů jsou elektronicky upraveny klopnými obvody, aby mohly být digitálně vyhodnocovány. Uspořádání čidla je naznačeno na Obr. 1.10, vznik impulzního signálu pak na Obr. 1.11.



Obr. 1.10 Příklad uspořádání optoelektrického (inkrementálního) čidla (převzato z [5])

Optoelektrická čidla tedy mají informaci o poloze nebo její změně zakódovanou v binárním nebo nějakém obdobném kódu. K přenosu se většinou používá TTL logika nebo diferenciální logika, která se navíc využívá ještě negované signály. [7][9][23][24]



Obr. 1.11 Vznik impulzního signálu v optoelektrickém čidle (převzato z [25])

Jejich výhodou je hlavně vysoké rozlišení, přímý převod na číslicový údaj, malé rozměry a hmotnost. Přesnost ale může být negativně ovlivněna proměnnou svítivostí diod a citlivostí fotodiód nebo nepřesně vystředěným uložením rotoru. Také zde hraje roli okolní prostředí jako například mechanické vibrace nebo elektromagnetické záření, které může rušit přenášené signály. [9][25]

Tato čidla nachází uplatnění v nejrůznějších rychlostních i polohových zpětných vazbách elektronicky řízených pohonů, v dopravních prostředcích, ale i v robotice. [24][25]

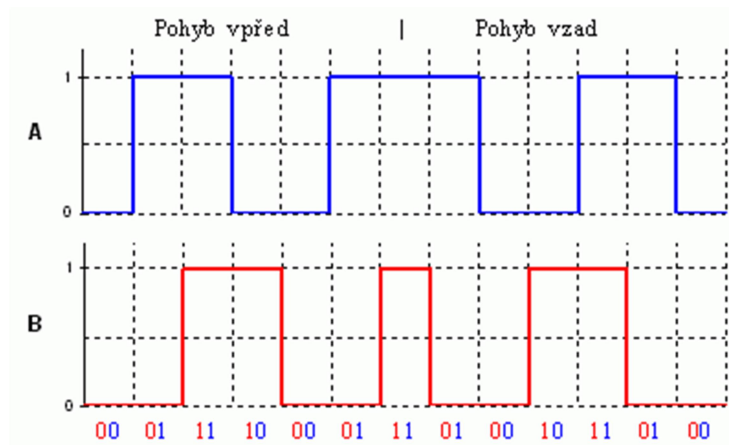
Dále budou popsána zvláště optoelektrická čidla v inkrementálním a absolutním provedení.

1.4.1 Inkrementální optoelektrická čidla

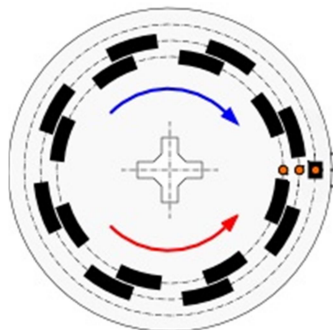
Inkrementální čidla (tedy přírůstková) mají zpravidla tři výstupy.

První dva (A a B) mají většinou několik set až tisíc impulzů na otáčku a jejich sled je posunut fázově o 90° , aby bylo možno při vyhodnocování určit směr otáčení. Ten je určen tím, který výstup generuje pulzy jako první (viz Obr. 1.12). Takové uspořádání výstupů se nazývá kvadrurní výstup, resp. signál.

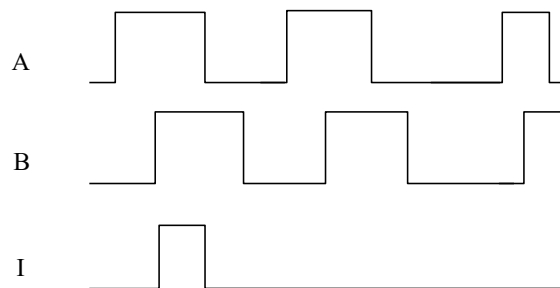
Třetí signál je tzv. nulový nebo též referenční (I). Má pouze jeden impulz na otáčku a určuje výchozí polohu, od které je počítána aktuální poloha z kvadrurního signálu (A a B) pomocí čítače. Impulz má stejnou šířku jako impulzy A a B nebo menší. Výstupní impulzy pro jeden směr otáčení jsou na Obr. 1.14.



Obr. 1.12 Signály inkrementálního čidla při pohybu vpřed a vzad (převzato z [3])

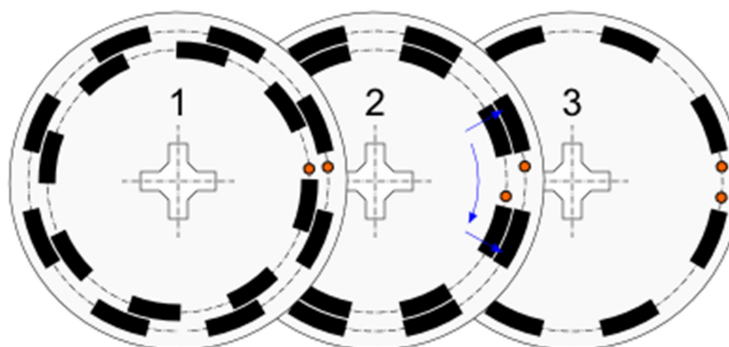


Obr. 1.13 Kotouč inkrementálního čidla (převzato z [26])



Obr. 1.14 Výstupní signály inkrementálního čidla

Signály A a B mohou vzniknout ze dvou stop na kotouči (Obr. 1.13) nebo z jedné kódové stopy posunutím dvou fotodetektorů o fázových 90° (Obr. 1.15). [9][23][25]



Obr. 1.15 Redukce počtu stop na kódovacím kotouči posunutím fotodetektoru (převzato z [27])

Rozlišení ve stupních takového čidla lze vypočítat jako:

$$\theta_1 = \frac{360}{n}, \quad (1.12)$$

kde n je počet impulzů na otáčku, který bývá uveden na štítku nebo v datasheetu. Takové rozlišení získáme, pokud jsou počítány náběžné hrany jednoho ze signálů A a B. Jak vyplývá z Obr. 1.14, například mezi dvěma náběžnými hranami signálu A jsou ještě dvě hrany signálu B a sestupná hrana signálu A. Rozlišení tedy může být ještě čtyřikrát větší (čidlo může měřit po čtyřikrát menším úhlu), pokud jsou vyhodnocovány všechny hrany [3][23]:

$$\theta_2 = \frac{360}{4n} = \frac{1}{4} \theta_1. \quad (1.13)$$

Inkrementální čidla nelze použít u mechanismů, které neprocházejí pravidelně nulovou polohou, protože nemohou být korigovány chyby v čítači vzniklé např. rušením. Navíc informace o poloze je po připojení napájení čidla k dispozici, až když je dosaženo nulové polohy. Proto se v náročnějších aplikacích používají absolutní čidla. [5][25]

1.4.2 Absolutní optoelektrická čidla

Absolutní optoelektrická čidla používají k přenosu informace o poloze prostorový kód, to znamená, že mají více výstupních signálů (bitů) než inkrementální čidla. Jeden bit určuje aktuální polovinu otáčky, ve které se rotor nachází, dvě stopy čtvrtinu atd. Kombinace výstupních signálů odpovídá jedné unikátní poloze rotoru. [9][10]

Rozlišení ve stupních je dáno počtem bitů:

$$\theta = \frac{360}{2^n}. \quad (1.14)$$

Kódy mohou být různé, často se používá binární kód nebo tzv. Grayův kód. Ten je na rozdíl od binárního bezpečný, protože při každé změně stavu se mění logická hodnota pouze jednoho bitu. To omezuje hazardy v mezních polohách. Grayův kód lze na binární kód převádět i z binárního kódu generovat pomocí hradel XOR nebo softwarově. Hodnota bitu v Grayově kódu je totiž rovna exkluzivnímu logickému součtu:

$$g_x = b_{x+1} \oplus b_x. \quad (1.15)$$

U nejvyššího bitu (pro čtyřbitové číslo např. g_3), který potřebuje ke svému generování binární hodnotu ve vyšším řádu (b_4) se tato hodnota uvažuje 0, potom je nejvyšší bit

v obou kódech stejný ($g_3 = b_3$) (viz Tab. 1.1). [5][7][28]

Dekadicky	Binárně				Grayovým kódem			
	b_3	b_2	b_1	b_0	g_3	g_2	g_1	g_0
	2^3	2^2	2^1	2^0	$b_n \oplus b_3$	$b_3 \oplus b_2$	$b_2 \oplus b_1$	$b_1 \oplus b_0$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	1	1	0
12	1	1	0	0	1	0	1	0
13	1	1	0	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0

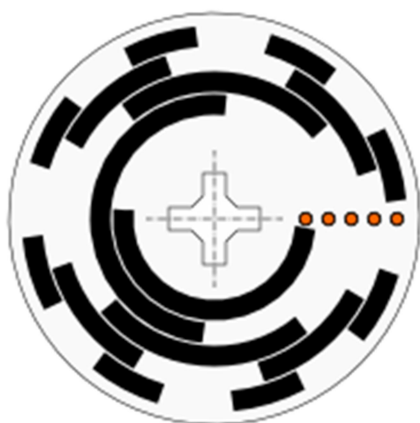
Tab. 1.1 Pravdivostní tabulka převodu čtyřbitového čísla mezi binárním a Grayovým kódem (převzato z [28])

Dekódování zpět do binárního kódu lze provést pomocí vztahu:

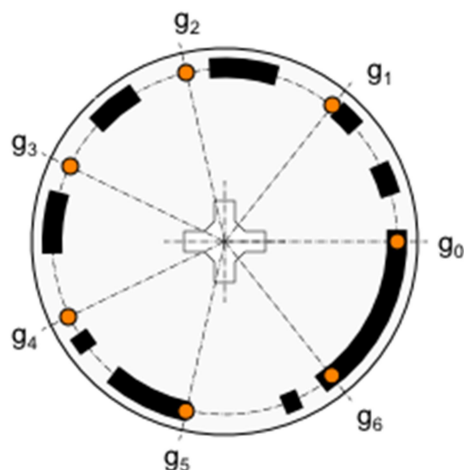
$$b_x = b_{x+1} \oplus g_x, \quad (1.16)$$

tedy také pomocí hradel XOR, ale protože je pro každý bit potřeba znát již vyhodnocenou úroveň vyššího řádu, musí dekodování probíhat od nejvyššího bitu k nejnižšímu. Nejvyšší bity v obou kódech se rovnají ($b_x = g_x$) a hodnota b_{x+1} se v tomto případě uvažuje 0. [28]

Podobně jako u inkrementálních čidel lze realizovat vytváření Grayova kódu v absolutních čidlech tak, že počet výstupních bitů odpovídá stopám na kotouči (Obr. 1.16) nebo je počet stop menší a fotodetektory jsou vhodně posunuty (Obr. 1.17). Pokud je na kotouči více stop, jsou umístěny tak, že řádově nejnižší stopy jsou umístěny do vnějších stop, protože mají nejvíce dělení, která je možno rozložit do dlouhých obvodů. Omezením počtu stop lze docílit výrobně jednodušší konstrukci kotouče, přičemž výsledný tvar stop je dán rozlišením a umístěním fotodetektorů. Na Obr. 1.17 je příklad absolutního čidla s jednou stopou a sedmi fotodetektory. I u těchto kotoučů platí, že se při změně polohy mění pouze jeden bit. [27][28]



Obr. 1.16 Absolutní optoelektrické čidlo s pěti stopami (převzato z [28])



Obr. 1.17 Absolutní optoelektrické čidlo s jednou stopou na kotouči a osmi výstupy (převzato z [27])

Absolutní optoelektrická čidla jsou vyráběna až se sedmnácti výstupy, což umožňuje mít 131 072 stavů na otáčku. Kromě rozlišení je jejich výhodou také to, že případné chyby lze korigovat z předešlých hodnot a není třeba čekat až na referenční značku jako u inkrementálních čidel. Oproti ostatním typům čidel jsou dražší a je nutné použít k jejich funkci více elektroniky. Někdy je také omezující jejich absolutní snímání pouze v jedné otáčce. To lze napravit vhodným převodem mezi motorem a čidlem, který ale může vést k vůlím v mechanismu a hysterezi, která následně ovlivňuje snímání polohy. [9][10]

2 NÁVRH ROZHRANÍ MEZI VÝVOJOVÝM KITEM A INKREMENTÁLNÍM ČIDLEM

Inkrementální optoelektrické čidlo Larm IRC 305/3600 KA, které bylo zvoleno pro detekci polohy a rychlosti hřídele, nemůže být přímo zapojeno do konektorů vybrané vývojové desky Digilent Basys2 s hradlovým polem, ve kterém je realizován dekodér, z několika důvodů.

- Čidlo musí být napájeno ze stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí 5 V/100 mA, ale vývojová deska má na svých konektorech k dispozici napájecí napětí 3,3 V.
- Přenos signálů z čidla je proveden v podobě diferenciálních signálů, které mají logické úrovně dány napětím mezi signálem a jeho komplementem s opačnou polaritou. To je zajištěno linkovými budiči (*line drivers*) v čidle. Na druhé straně vedení musí být k dispozici linkový přijímač (*line receiver*), který měří napětí diferenciálních signálů a převádí je na logické úrovně dané napětím proti zemi. Takový přijímač na vývojové desce není. V našem případě, v němž je čidlo napájeno 5 V, odpovídají logické úrovně diferenciálních signálů 5 V a -5 V. Vývojová deska pracuje s logickými úrovněmi 3,3 V a 0 V proti zemi. [29][30][31]

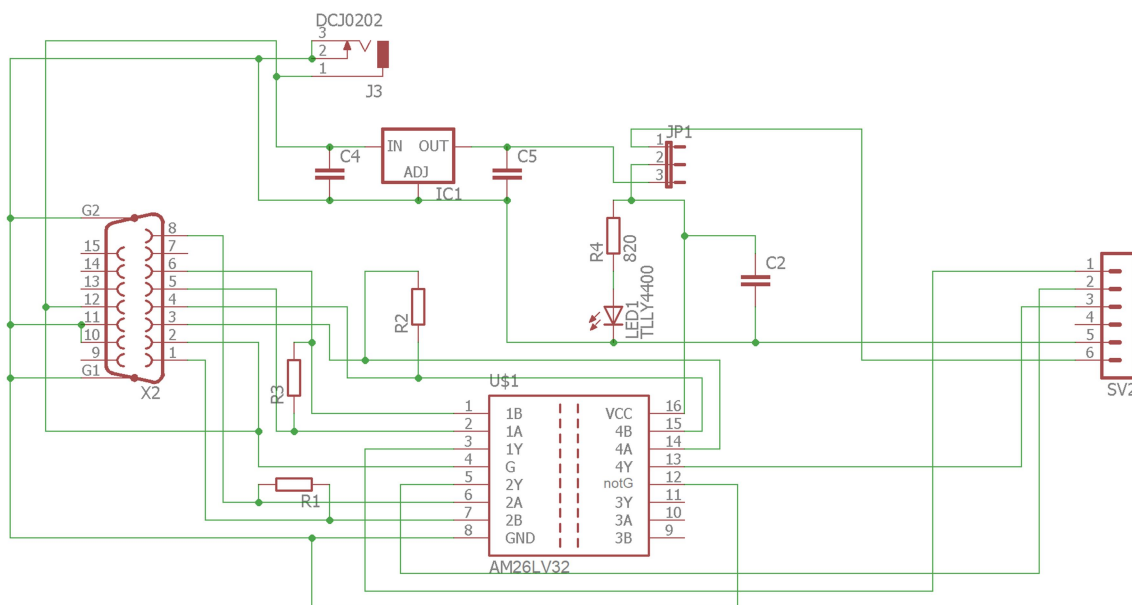
Za účelem odstranění těchto problémů s nekompatibilitou bylo navrženo schéma plošného spoje (viz Obr. 2.1), které obsahuje především integrovaný obvod AM26LV32, což je linkový přijímač, který převádí diferenciální signál rovnou na napěťové úrovně 3,3 V a 0 V. Ten má 16 pinů a může převádět až čtyři diferenciální signály. K tomu slouží z každé strany 2×3 piny (A a B vstupy, Y výstup). Nám stačí převádět tři diferenciální signály, ostatní tři piny jsou nezapojeny. Další piny jsou zem, napájení, G a not G, kterými se dá ovládat přijímání. V našem případě může být přijímání stále zapnuto, proto je G připojeno trvale k 5 V a not G k zemi (viz Tab. 2.1). K napájení musí být podle datasheetu [31] připojen kondenzátor (C2) s kapacitou 100 nF.

DIFERENCIÁLNÍ VSTUP			VÝSTUP
	G	\bar{G}	
$U_{ID} \geq 0.2 \text{ V}$	H	X	H
	X	L	H
$-0.2 \text{ V} < U_{ID} < 0.2 \text{ V}$	H	X	?
	X	L	?
$U_{ID} \leq -0.2 \text{ V}$	H	X	L
	X	L	L
Nakrátko, nebo zakončeno	H	X	H
	X	L	H
X	L	H	Z

H = Vysoká úroveň L = Nizká úroveň X = Jakákoliv úroveň Z = Vysoká impedance ? = Neurčitě

Tab. 2.1 Tabulka funkcí diferenciálních vstupů ([31], upraveno)

Dále plošný spoj obsahuje konektory pro připojení čidla (*canon* 15-pin dvouřadý – samice), vývojového kitu (*header* 6-pin – samec) a zdroje stabilizovaného stejnosměrného napětí 5 V (souosý konektor – tzv. *jack*). Připojení jednotlivých pinů konektoru *canon* bylo provedeno podle zapojení výstupních pinů čidla tak, aby si čísla odpovídala podle tabulky *Description of connection elements* na str. 2 datasheetu čidla [29].



Obr. 2.1 Schéma zapojení plošného spoje

Pro potlačení odrazů signálu na vedení musí být před vstupy do přijímače mezi komplementárními signály umístěny zakončovací rezistory – terminátory (R1-R3). Ty mají mít odpor podle charakteristické impedance kabelu – 70 až 120 Ω . Pro realizaci se předpokládalo, že kabel nebude delší než 5 m. Proto byla zvolena hodnota odporů 120 Ω . Pro delší kabely by bylo vhodné použít navíc i zakončovací kondenzátory. [31]

Integrovaný obvod lze napájet 3,3 V buď z vývojové desky nebo přes stabilizátor LD1117 (IC1) s pomocnými kondenzátory (C4 a C5) ze zdroje 5 V. Volba zdroje napájení závisí na zapojení *jumperu* (JP1). [32]

Pro indikaci napájení přijímače je přes rezistor (R4) sériově zapojena LED, která odebírá malý proud, aby ji bylo možno společně s přijímačem napájet i z vývojové desky. Hodnota předřadného odporu byla vypočtena z požadovaného proudu a napětí diody 2 mA/1,85 V a napájecího napětí 3,3 V pomocí Ohmova zákona:

$$R_4 = \frac{U_{\text{NAP}}}{I} - \frac{U_{\text{D}}}{I} = \frac{3,3}{0,002} - \frac{1,85}{0,002} = 725 \Omega . \quad (2.1)$$

Vzhledem k požadavku nízkého proudu a dostupnosti byl zvolen rezistor 820 Ω .

Seznam všech použitých součástek a jejich parametrů je uveden v příloze A.1.

Schéma bylo vytvořeno v programu Eagle ze součástek dostupných v knihovně, pouze přijímač AM26LV32 musel být vytvořen, protože jemu podobná součástka nebyla v knihovně k dispozici.

Poté byl vytvořen návrh desky. Vzhledem k tomu, že přijímač byl dostupný jen v SMD pouzdře a má vstupy jednotlivých diferenciálních signálů na stejné straně jako výstupy, bylo jednodušší vytvořit návrh jako dvouvrstvý. Všechny součástky jsou umístěny na vrchní straně, na spodní jsou pouze spoje. Schémata obou vrstev jsou v přílohách A.3. a A.4.

Deska byla vyrobena ve firmě Pragoboard s.r.o., následně osazena všemi součástkami, oživena a otestována její správná funkce při přivedení 5 V nebo -5 V mezi komplementární vstupy každého diferenciálního vstupu.

3 NÁVRH DEKODÉRU KVADRATURNÍHO SIGNÁLU

Dekodér kvadraturního signálu byl navržen pro vývojovou desku Digilent Basys2 s hradlovým polem Xilinx Spartan3E-100. Tato deska má mimo jiné i šestipinové konektory pro připojení externích zařízení a sedmissegmentový displej pro zobrazení až čtyř číslic. Toho je využito právě pro připojení čidla, resp. rozhraní a pro zobrazení dekodovaných údajů.

Návrh byl vytvořen v jazyce VHDL v programu Xilinx ISE 13.2 a průběžně simulován nástrojem ISim jak v režimu Behavioral, tak i Post-Place & Route, ve kterém je počítáno i zpoždění signálů podle použitých hradel a cest.

Funkce tohoto dekodéru jsou následující:

- výpočet polohy rotoru v rozlišení 3 600 a 14 400 impulzů na otáčku,
- výpočet rychlosti otáčení,
- zobrazení hodnot na displeji,
- přepínání mezi zobrazením rychlosti a polohy (přepínačem SW2),
- přepínání rozlišení zobrazované polohy (přepínačem SW1),
- přepínání zobrazovaných řádů (desetitisíce-desítky nebo tisíce-jednotky) (přepínačem SW0),
- indikace jedničky v řádu deseti tisíc (diodou LD0),
- indikace směru otáčení (diodami LD2 a LD3),
- indikace průchodu výchozí polohou po stisknutí tlačítka BTN3 (diodou LD7) (užitečné po připojení napájení).

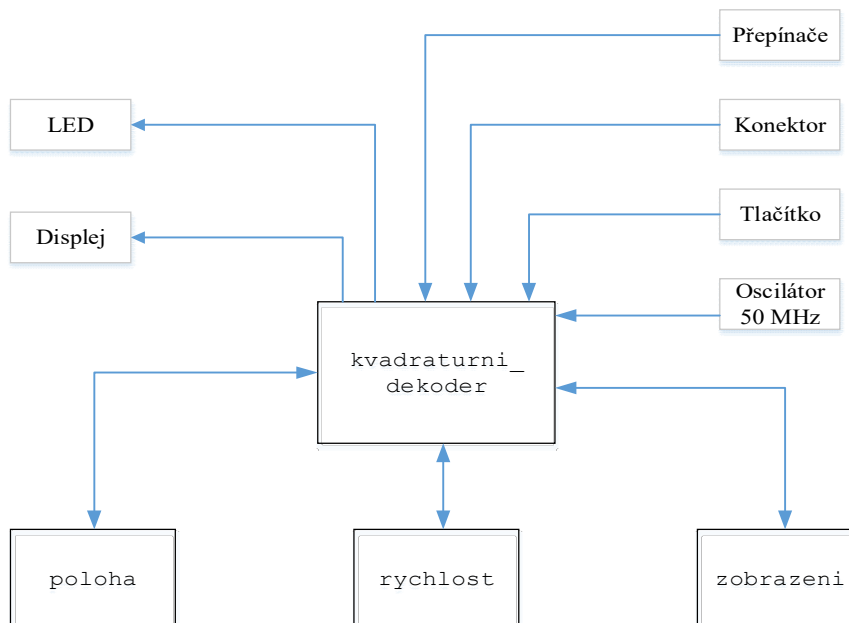
3.1 Hlavní modul a hierarchie

Celý návrh se skládá z modulů, jež mohou být tvořeny dalšími moduly – komponenty. Tak vzniká hierarchická struktura. Na vrcholu je hlavní modul, který má vstupy a výstupy „spojeny“ s použitými perifériemi (displejem, konektorem apod.).

Tímto modulem je `kvadraturni_dekoder`, který se skládá ze tří komponentů (viz Obr. 3.1). V komponentech `poloha` a `rychlost` jsou vypočítávány hodnoty pro zobrazení, o které se stará třetí komponent `zobrazeni`. Hodnoty jsou předávány čtrnáctibitovými čísly (čtrnácti signály, které tvoří složky jednoho vektoru). O tom, která z hodnot bude zobrazována, rozhoduje proces přepínání mezi polohou a rychlostí.

Hlavní modul obsahuje ještě jeden proces – pro indikaci dosažení výchozí polohy, aby bylo jasné, kdy lze po připojení napájení považovat zobrazované hodnoty za pravdivé. Pokud je stisknuto tlačítko BTN3, rozsvítí se dioda LD7, která po průchodu výchozí polohou zhasne a zůstane zhasnutá až do dalšího stisku tlačítka. Navrhnout tuto funkci bez použití tlačítka nelze, protože po připojení napájení desky se stává, že při

nahrávání programu z paměti ROM jsou nesprávně detekovány impulzy v referenčním signálu, které se v něm mají objevit jen při průchodu rotoru nulovou polohou. Tyto impulzy čekání na první referenční signál ukončí.



Obr. 3.1 Hierarchie z pohledu hlavního modulu

Propojení hlavního modulu s periferiemi popisuje soubor `basys2_popis_signal_pin.ucf`, v němž je každému vstupnímu nebo výstupnímu signálu přiřazen pin periferie.

3.2 Poloha

Modul `poloha` vyhodnocuje z kvadrturního a referenčního signálu aktuální polohu rotoru čidla. Tato poloha je počítána v rozlišení 14 400 impulzů na otáčku v modulu `rozliseni_14400`. V modulu `poloha` je provedeno přepínání mezi rozlišeními. Pokud je přepínač v poloze 0, je zobrazována poloha s rozlišením 14 400, pokud je v poloze 1, je zobrazována s rozlišením 3 600. To odpovídá vydělením výstupního čísla z modulu `rozliseni_14400` čtyřmi a je to provedeno tak, že do dvou nejvyšších bitů (složek vektoru) výstupního čísla, jsou vloženy nuly a do ostatních je vloženo vyhodnocené číslo, přičemž jeho nejnižší dva bity jsou nezapojeny. Tato část kódu vypadá následovně:

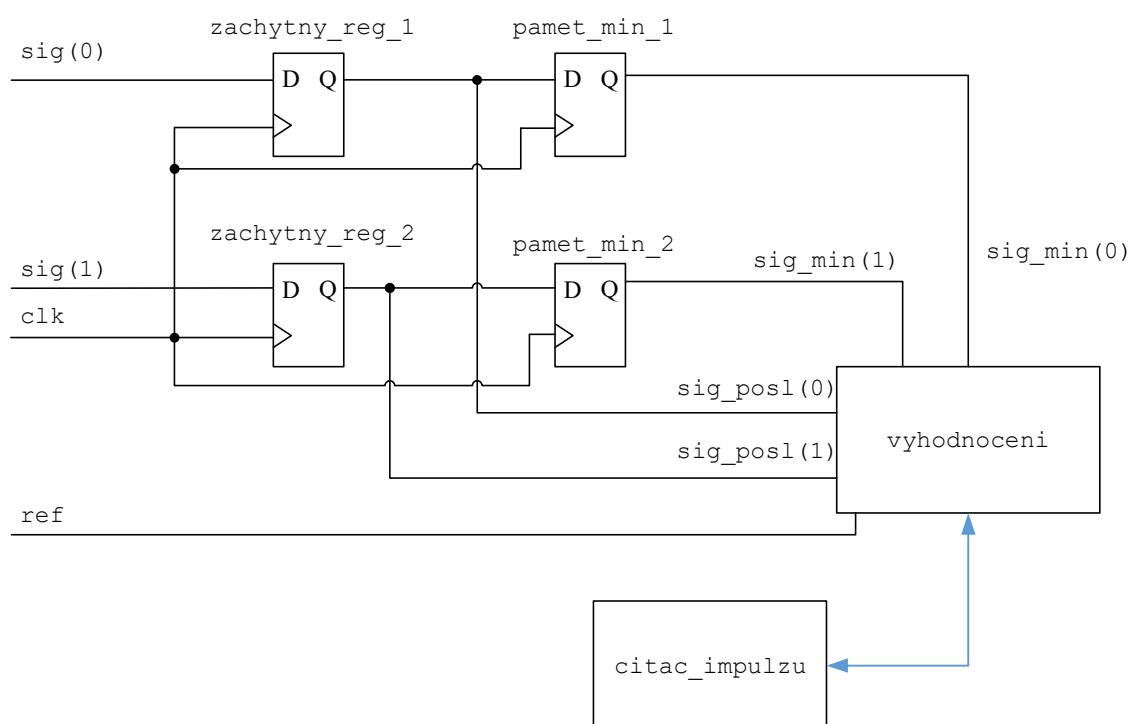
```

if prep_rozliseni='1' then
    vystup_poloha <= "00" & poloha_14400(13 downto 2);
else
    vystup_poloha <= poloha_14400;
end if;
  
```

3.2.1 Vyhodnocování polohy

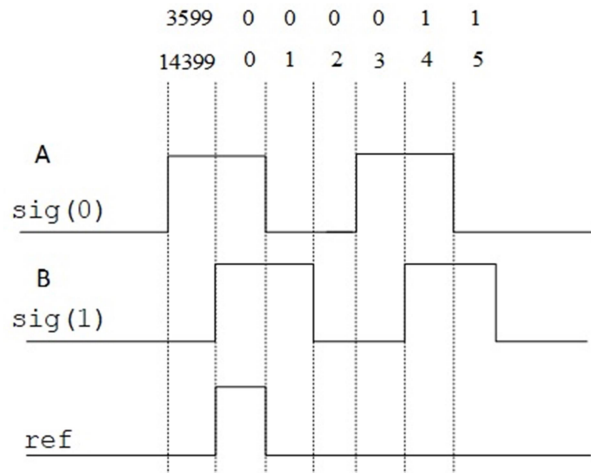
Vyhodnocování polohy v rozlišení 14 400 impulzů na otáčku probíhá v modulu *vyhodnoceni*, jehož vstupy tvoří kvadrurní signál, referenční signál a hodiny napojené na oscilátor 50 MHz a výstupy tvoří binární číslo s údajem polohy, které nabývá hodnot 0 až 14 399, a signál indikace směru otáčení.

Modul se skládá ze čtyř klopných obvodů a čítače impulzů, které jsou přidány jako komponenty. První dva klopné obvody zachycují na náběžnou hranu hodin hodnoty kvadrurního signálu. Po uplynutí periody hodin (20 ns) se tyto signály dostanou na výstup druhých dvou klopných obvodů. Tímto způsobem je k dispozici poslední odebraný vzorek signálů a minulý vzorek (viz Obr. 3.2). Řešení ošetření zákmitů nebylo v tomto návrhu uvažováno. Testování ukázalo, že to skutečně nebylo zapotřebí.



Obr. 3.2 Zapojení pro uložení dvou po sobě jdoucích vzorků kvadrurního signálu s názvy modulů a signálů

Samotné vyhodnocování probíhá tak, že jsou na každý impuls hodin porovnávány vektory *sig_posl* a *sig_min*, tedy poslední a předposlední vzorky signálu. Pokud je zjištěno, že nejsou stejné a došlo k posunu rotoru, je povoleno zvýšení nebo snížení obsahu čítače podle toho, jaká byla zjištěna změna, tedy jakým směrem se rotor otáčí. Podle toho je také nastavena indikace směru. Pokud jsou signály stejné nebo by byl zjištěn chybný sled signálů (např. z A = 0, B = 0 do A = 1, B = 1) čítání je zakázáno (pro snazší pochopení jsou signály na Obr. 3.3).



Obr. 3.3 Kvadrurní signál (A, B) s referenčním (ref) a hodnoty čísla pro obě rozlišení

Na každý impuls hodin je také kontrolována hodnota referenčního signálu. Pokud by byla log 1, čítač je ihned vynulován. Zdrojový kód procesu vyhodnocování polohy vypadá následovně:

```

if RISING_EDGE(clk) then

--když jde první sig A, a je detekována změna signálu - hrana
if (sig_posl = "11" and sig_min="10") or (sig_posl = "01" and
sig_min="11") or (sig_posl = "00" and sig_min="01") or (sig_posl
= "10" and sig_min="00") then

    ink <= '1';           --zvyšovat čítač
    nacist <='1';        --povoleni počítat
    indikace_smer <='1'; --indikace směru otáčení

--když jde první sig B, a je detekována změna signálu - hrana
elsif(sig_posl ="00" and sig_min="10") or (sig_posl = "01"
and sig_min="00") or (sig_posl = "11" and sig_min="01") or
(sig_posl = "10" and sig_min="11") then

    ink <='0';           --snižování čítače polohy
    nacist <='1';        --povoluje počítat
    indikace_smer<='0';  --indikace směru otáčení
else
    nacist <= '0';
end if;
--pokud je referenční signál 1, je počítadlo polohy vynulováno
if ref='1' then
    reset <= '1';
else
    reset <='0';
end if;
end if;

```

Čítač je navržen jako zvyšující i snižující, má danou maximální hodnotu (v tomto

případě 14 399), po jejímž dosažení čítá znova od nuly. Také po snižování až do nuly je následující hodnota právě maximum. K čítání dochází pouze, pokud `NACIST = 1`. Signál, se kterým se provádějí matematické operace `inter_pocet`, není typu `STD_LOGIC_VECTOR`, ale musí být `UNSIGNED`.

Pokud je aktivní vstup `RESET`, ihned je obsah čítače vynulován, nečeká se na signál hodin. Proces čítače vypadá takto:

```

process (CLK, RESET)
  begin
    if RESET='1' then                                --nulování čítače
      inter_pocet <= (others => '0');
    elsif RISING_EDGE(CLK) then                       --náběžná hrana hodin
      if NACIST = '1' then                             --pokud je povoleno čítání
        if INK = '1' then                               --když se má obsah zvyšovat

--pokud je obsah proměnné roven maximální hodnotě, vloží se do ní 0,
--pokud není roven maximální hodnotě, přičítá
          if inter_pocet >= unsigned(MAX) then
            inter_pocet <= (others => '0');
          else
            inter_pocet <= inter_pocet+1;
          end if;
        else                                           --pokud se má snižovat

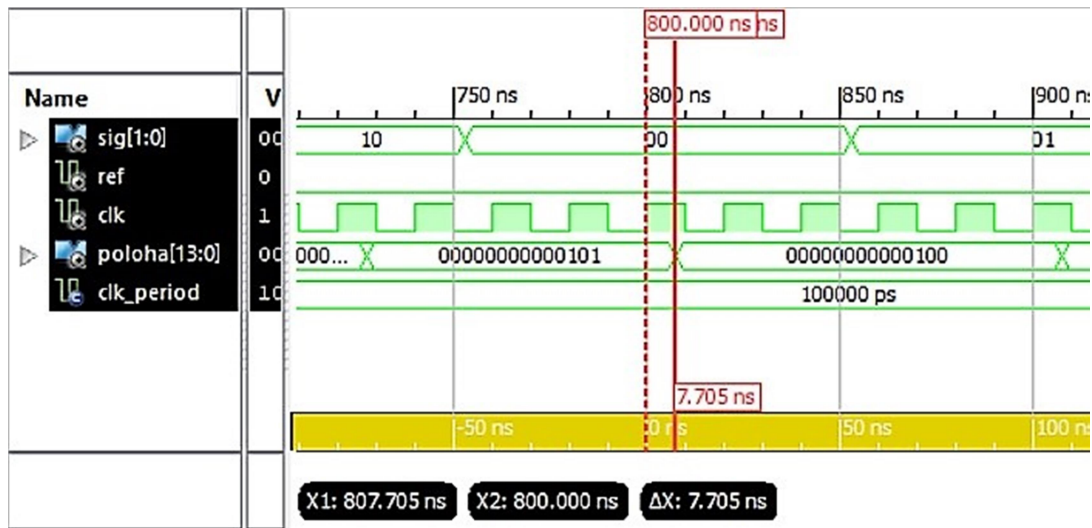
--když je obsah čítače 0, vloží se do proměnné maximální hodnota,
--pokud není roven 0, odečítá
          if inter_pocet = 0 then
            inter_pocet <= unsigned(MAX);
          else
            inter_pocet <= inter_pocet-1;
          end if;
        end if;
      end if;
    end if;
  end process;

```

Také D klopné obvody jsou vytvořeny behaviorálně, tzn. pomocí procesu s posloupností příkazů. Podobně jako čítače reagují na náběžnou hranu hodinového signálu a propouští signál z vstupu `D` na `Q`.

Je důležité si uvědomit, že pokud dojde ke změně některého ze signálů, trvá nějakou dobu, než přijde náběžná hrana hodin. Když přijde, registry zachytí nový signál a minulý posunou dál. V tuto chvíli jsou signály k dispozici pro porovnání. To proběhne na další náběžnou hranu hodin. Proces povolí čítání, které proběhne na další hranu hodin. Tedy změna polohy se ve výsledném čísle projeví minimálně po třech periodách hodinového signálu a maximálně teoreticky po čtyřech periodách (záleží, v jakou chvíli ke změně dojde). Protože perioda hodin je při 50 MHz 20 ns, mělo by vyhodnocení trvat 60 až 80 ns. Ve skutečnosti ještě musíme připočítat rychlost čítače, který se skládá z kombinačních a sekvenčních obvodů. Z měření v simulaci Post-Place & Route

vyplývá, že typicky od hodinového impulzu, který mění obsah čítače, do změny výstupního signálu `poloha` uplyne necelých 8 ns (viz Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Zpoždění výstupu po změně kvadrurního signálu (vznačeno zpoždění čítače)

Vzhledem k tomu, že použité čidlo je určeno pro maximální rychlost 10 000 ot/min a počet hran obou signálů dohromady na otáčku je 14 400, minimální čas mezi hranami by měl být [29]:

$$t = \frac{1}{\frac{nN}{60}} = \frac{60}{10000 \cdot 14400} = 416 \text{ ns} . \quad (3.1)$$

Tedy zpoždění vyhodnocování polohy, které může dosáhnout až 88 ns je z tohoto pohledu uspokojivé. Navíc, i když by byly impulzy rychlejší, nevadí to, protože záchytné registry odebírají aktuální hodnoty každých 20 ns a dále již tyto vzorky nemohou být změnami kvadrurního signálu ovlivněny. Pouze by informace o poloze byly zpožděné. To může u tohoto čidla nastat v případě zastavení na hraně dvou stavů signálu.

3.3 Rychlost

Modul `rychlost` vyhodnocuje rychlost otáčení. Jeho vstupem je kvadrurní signál a hodinový signál a výstupem je čtrnáctibitové číslo udávající rychlost v otáčkách za minutu. Rychlost je určena z počtu impulzů zachycených za určitou dobu. Kdybychom počítali impulzy jednoho ze signálů například za jednu milisekundu, muselo by být číslo `N` v čítači následně přepočteno na otáčky za minutu `n` následovně:

$$n = N \frac{60000}{3600}. \quad (3.2)$$

Protože násobení a dělení binárního čísla čísly, které nejsou mocninami dvou, je pro hradlové pole obtížné a trvá dlouho, je raději zvolen vhodný čas počítání tak, aby následně stačilo dělit číslo čítače některou mocninou dvou. Když si představíme, že se bude rotor otáčet rychlostí 1 ot/min, znamená to, že za tuto minutu bude načítáno 3600 impulzů. My ale potřebujeme, aby výstupem čítače bylo číslo 1. Toho docílíme tím, že budeme počítat místo minuty pouze po čas:

$$T = \frac{60}{3600} = 0,01\bar{6} \text{ s}. \quad (3.3)$$

Protože tento čas je dost krátký a při rychlých změnách otáček by nešlo rozeznat na displeji konkrétní číslo (člověk by na sedmisegmentovém displeji viděl stále osmičku), je čas čítání šestnáctkrát prodloužen na $T = 0,2\bar{6}$ s. Samozřejmě, aby výsledné číslo bylo zachováno, musí být počet impulzů dělen šestnácti. To znamená, že se z výsledného čísla vyberou vyšší bity a poslední čtyři se dále nepřenášejí.

Čítání impulzů je provedeno podobně jako v modulu `vyhodnoceni` pro polohu (viz Obr. 3.2), ale při pohybu rotoru takovém, že nejprve nabíhá signál A, jsou počítány pouze náběžné hrany signálu B (pro snazší pochopení viz Obr. 3.3). Při opačném pohybu jsou počítány sestupné hrany signálu B.

Další změnou je potlačení zákmitů a tedy i špatného zobrazování rychlosti při zastavení přesně na hraně tím, že mezi každým čítáním na hraně signálu B musí být zaznamenán stav signálu $A = 0, B = 0$. To je provedeno pomocí pomocného signálu x , který je v tomto stavu nastaven na log 1 a po příchodu hrany signálu B a inkrementování čítače je vrácen na log 0.

Mimo komponentů pro správné čítání impulzů obsahuje modul `rychlost` ještě čítač pro určení času, po kterém jsou impulzy poslány k zobrazení a čítač impulzů je vynulován. Výše bylo popsáno získání vhodného času $T = 0,2\bar{6}$ s. Tento čas odpovídá při periodě hodinového signálu $T_{\text{clk}} = 20 \text{ ns}$ počtu impulzů:

$$N = \frac{T}{T_{\text{clk}}} = \frac{0,2\bar{6}}{2 \cdot 10^{-8}} \doteq 13\,333\,333. \quad (3.4)$$

Ale protože další perioda začíná nulou a ne jedničkou a ještě je nutné počítat jeden hodinový impulz na vypnutí resetu čítačů, je čítač času nulován o dva hodinové impulzy dřív. Tedy reset je nastaven na log 1 po napočítání 13 333 331 hodinových impulzů. Situace je znázorněna na Obr. 3.5 v simulaci Behavioral. Proces vyhodnocování rychlosti je následující:

```

process (clk)
  begin
    if RISING_EDGE(clk) then

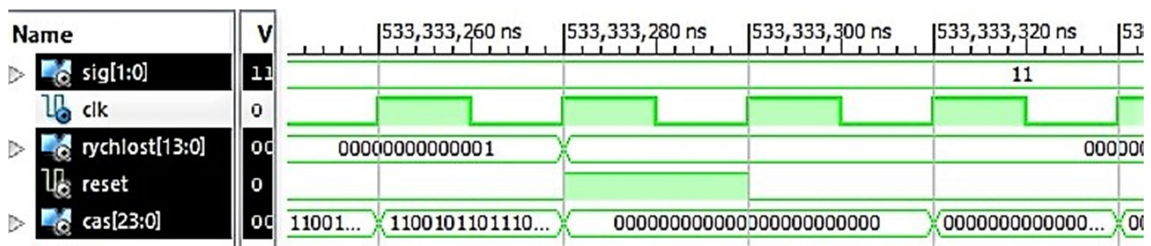
--dosažení času 0,266666666 s
      if cas ="110010110111001101010011" then

--vynulování čítačů a posláni hodnoty rychlosti na výstup
        reset <= '1';
        rychlost <= rychlost_delena;
      else
        --pokud je čas jiný, reset jde do nuly
        reset <='0';
      end if;
      if sig_posl ="00" then
        x<='1';
      end if;

--pokud přijde vzestupná hrana na B při prvním signálu A nebo sestupná
hrana B při prvním signálu B, inkrementuje čítač impulzů
      if (sig_posl = "11" and sig_min="10") or (sig_posl = "10"
and sig_min="11") then

--inkrementace, pokud předtím došlo k průchodu signálem 00
        if x='1' then
--povolení čítače na další hranu hodin
          nacist <='1';
          x<='0';
        end if;
--pokud není změna signálů nebo je jiná hrana, čítač se nemění
      else
        nacist<='0';
      end if;
    end if;
  end process;

```



Obr. 3.5 Nulování čítačů a vložení počtu impulzů na výstup po dosažení periody čítání.

Oba čítače, jak času, tak kvadraturního signálu, jsou pro zjednodušení 24-bitové. To vychází ze zápisu čísla 13 333 331 v binární soustavě.

Z čísla, které je na konci periody čítání v čítači impulzů k dispozici, jsou spodní čtyři bity odstraněny kvůli dělení šestnácti. Vrchních šest bitů také není použito, jelikož do 10 000 ot/min, pro které je čidlo konstruováno, stačí v binární soustavě čtrnáct bitů.

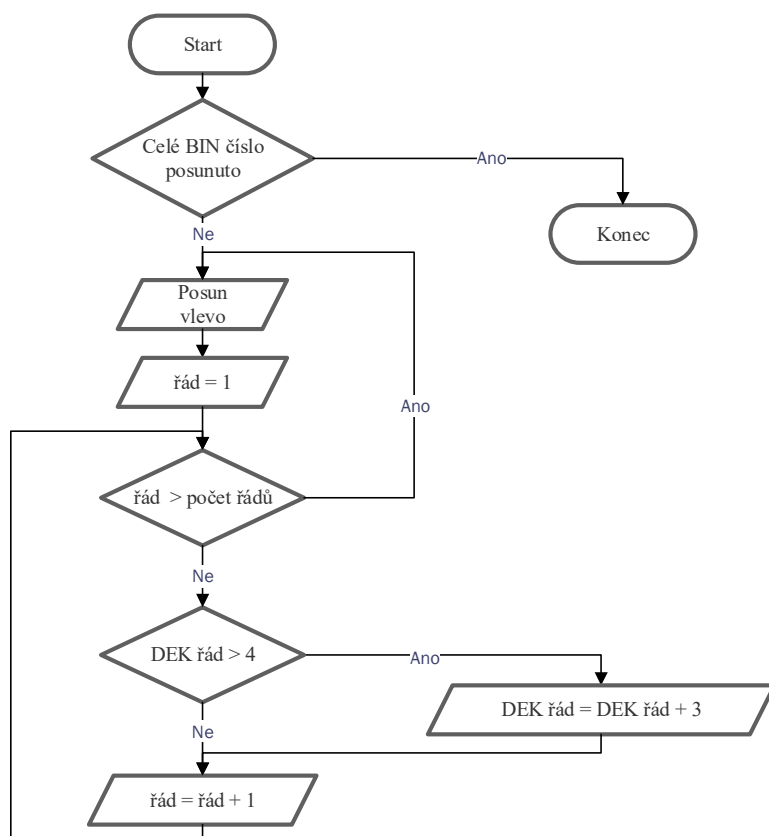
Toto čtrnáctibitové číslo je výstupem modulu `rychlost`. [29]

3.4 Zobrazování

Modul `zobrazeni` má provádět převod binárních čísel z modulů popsaných výše na signály přivedené k sedmissegmentovému displeji.

3.4.1 Převod binárních čísel na dekadická

První, co je nutné s binárními čísly udělat, je převést je na dekadická v binárním zápisu. To znamená, že každý řád v desítkové soustavě bude popsán čtyřmi bity a tyto jednotlivé řády dají dohromady jedno dekadické číslo. K tomuto převodu slouží algoritmus tzv. *double dabble* v modulu `prevod_bin_dek`, jehož vývojový diagram je na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Vývojový diagram algoritmu *double dabble*

Máme dvě čísla s binárním zápisem. Vpravo je převáděné binární číslo a vlevo je vznikající dekadické číslo v binárním zápisu. Binární číslo je posouváno o jeden bit vlevo, dokud není celé posunuto, a zároveň je mezi každým posunem kontrolován každý řád dekadického čísla. Pokud je některý řád větší než 4, je k němu přičteno číslo 3. [33]

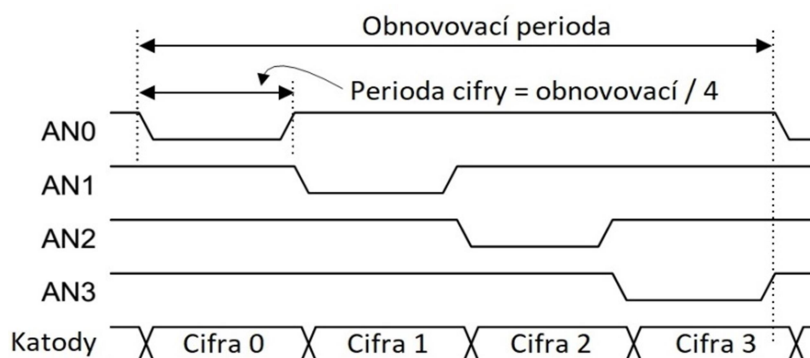
	Desítky	Jednotky	Binární číslo
Start	0000	0000	11111
Posun	0000	0001	11110
Posun	0000	0011	11100
Posun	0000	0111	11000
Přičtena 3 do jednotek	0000	1010	11000
Posun	0001	0101	10000
Přičtena 3 do jednotek	0001	1000	10000
Posun	0011	0001	00000
	3	1	

Tab. 3.1 Postup převodu čísla 31 z binární do dekadické soustavy

3.4.2 Vytvoření signálů pro displej

Pro navrhování dalších komponentů zobrazování je nutné si uvědomit, jak funguje sedmissegmentový displej na vývojové desce.

Displej má čtyři cifry a každá má sedm LED, které tvoří osmičku, když jsou všechny rozsvíceny. Všechny anody LED jedné cifry jsou spojeny, displej má tedy čtyři anodové vstupy. Katody všech LED na odpovídajících si pozicích v číslicích jsou také spojeny, katodových vstupů je tedy sedm (navíc jeden pro ovládání řádové tečky, která ale není v této práci použita). Zobrazování na displeji je rozděleno v čase na čtyři části, přičemž v každé svítí pouze jedna číslice podle aktuálního zapojení anod a katod (viz Obr. 3.7). Doby svícení jsou ale tak krátké, že lidské oko není schopno změny zachytit, takže se zdá, že všechny číslice svítí.



Obr. 3.7 Ovládání displeje pomocí anod a katod LED v čase (upraveno z [30])

LED svítí, když je na její katodu přivedena log 0 a na anodu také log 0, protože každá anoda je připojena přes PNP tranzistor ke zdroji 3,3 V a výstup z hradlového pole je připojen k bázi náležitýho tranzistoru. [30]

Návrh musí zajistit přepínání aktivní anody a tedy rozsvíceného řádu čísla. Proto

byl vytvořen modul `vyber_cislice`, jehož výstup je právě čtyřbitový vektor, který řídí anody. Skládá se z komponentu čtrnáctibitového čítače, který počítá hodinové impulzy do hodnoty 16 383, což odpovídá přibližně času 328 μ s. Po tomto čase se v procesu posune nula ve výstupním vektoru o jeden bit vlevo. Pokud je nula v nejvyšším bitu, je v příští změně vrácena do prvního bitu. Zdrojový kód tohoto procesu je následující:

```
signal in_vyber_radu: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0) := "1110";
process(cislo_citac,clk)
begin
  if RISING_EDGE(clk) then
--když je dosaženo 328us
    if cislo_citac="11111111111111" then
--pokud je nejvyšší bit 1
      if in_vyber_radu(3) = '1' then
        in_vyber_radu <= in_vyber_radu(2 downto 0) & '1';
--pokud je nejvyšší bit 0
      else
        in_vyber_radu <= in_vyber_radu(2 downto 0) & '0';
      end if;
    end if;
  end if;
end process;
```

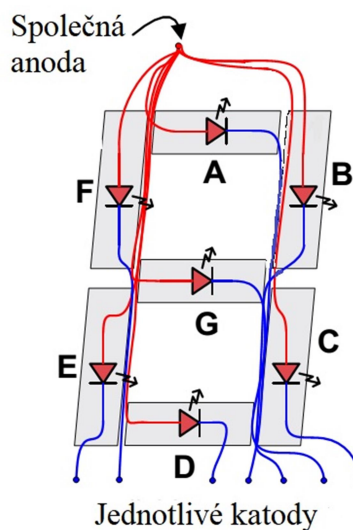
Modul pro obsluhu katod je pojmenován `vyber_diod` a jeho vstupem je vektor signálů anod, převedené dekadické číslo v binárním zápisu z modulů pro výpočet polohy a rychlosti a také přepínač řádů, který umožňuje posunout řády na displeji vpravo o jednu pozici. Toho lze využít, například pokud je zobrazována poloha v rozlišení 14 400. Místo tisíců jsou zobrazovány desetitisíce, místo stovek tisíce atd. Výstupem modulu je vektor sedmi signálů katod a signál, který indikuje, že řád desetitisíců není nulový.

Modul obsahuje jeden komponent, který z čísla, které má být zobrazeno, počítá, jaké mají svítit LED. Na tento komponent je číslo přivedeno podle toho, jaký řád má být zrovna zobrazován podle aktuálně aktivní anody. K tomu slouží dva příkazy *case*, jeden pro zobrazení jednotek až tisíců, druhý pro zobrazení desítek až desetitisíců, jejichž použití řídí uživatel přepínačem (SW0).

Samotný komponent `vyber_LED` obsahuje kombinační obvody, které z čísla 0 až 9 vytvoří sedm signálů, které jsou přes invertor přenášeny na katody LED. Logické funkce jsou totiž pro přehlednost vytvořeny tak, že pro svítící LED je výstup na log 1. Sedm funkcí bylo vytvořeno podle pravdivostní tabulky Tab. 3.2 (označení jednotlivých LED viz Obr. 3.8) a Karnagových map.

	Číslice				Katody						
	x3	x2	x1	x0	A	B	C	D	E	F	G
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

Tab. 3.2 Pravdivostní tabulka funkcí pro svícení LED



Obr. 3.8 Pojmenování jednotlivých segmentů (upraveno z [30])

V celém návrhu dekodéru bylo dbáno na to, aby žádné akce nebyly prováděny na náběžnou hranu jiného signálu než hodinového, protože právě hodinový signál má v hradlovém poli určeny speciální cesty takové, aby se šířil rychle a aby přišly jeho hrany na všechna hradla ve stejný okamžik. Pokud se někde detekuje náběžná hrana jiného signálu než hodinového, může nastat problém s časováním.

Celý návrh dekodéru je k dispozici na přiloženém CD.

4 ZÁVĚR

V první části byly podrobně vysvětleny principy různých čidel polohy a rychlosti otáčení hřídele točivých strojů. Existuje mnoho typů, které umožňují získat informace jak pro obsluhu zařízení nebo nadřazený řídicí počítač, tak pro zpětné vazby regulačních smyček. Pro řízení servopohonů jsou vhodnější absolutní čidla, naopak pro rychloběžné pohony často postačují inkrementální čidla.

Ve druhé části byl popsán návrh rozhraní mezi konkrétním inkrementálním čidlem a vývojovým kitem. Vyrobený a oživený plošný spoj byl úspěšně testován pro konstantní úrovně diferenciálních vstupů.

V poslední části byla popsána realizace dekodéru kvadrurního signálu a návrhu zobrazení hodnot na displeji vývojové desky. Chování celého návrhu bylo nejprve simulováno ve vývojovém prostředí. Po odstranění drobných chyb byl dekodér s rozhraním připojen k čidlu pětimetrovým kabelem a čidlo bylo upevněno na hřídel stejnosměrného motoru. Správná funkce celého návrhu byla úspěšně ověřena do jmenovitých otáček motoru, tj. 1 400 ot/min pomocí digitálního otáčkoměru.

Takto realizovaný dekodér s čidlem by bylo možno rovnou použít jako ukazatel rychlosti do 10 000 ot/min a polohy s rozlišením 3 600 impulzů na otáčku, což odpovídá desetinám jednoho stupně. Pro indikaci polohy s rozlišením 14 400 impulzů na otáčku by bylo vhodné mít k dispozici ještě jednu číslici na displeji navíc, která by ukazovala řád desetitisíců místo LED použité v tomto návrhu. Nicméně vývojový kit další řádovou číslici nedisponuje.

LITERATURA

- [1] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. uprav. a doplň. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [2] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. Praha: ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [3] LOCKER, Martin. Inkrementální enkodér. *Robot klub Rychnov* [online]. Červenec 2009 [cit. 2018-05-2]. Dostupné z: <http://robotika.vosrk.cz/guide/sensors/decode/cs>
- [4] MAIXNER, Ladislav a kol. *Mechatronika*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-1299-3.
- [5] Čidla rychlosti a polohy. [online]. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/TPREP/Cidla_rychlosti.pdf
- [6] MICHNA, Vladimír. Snímače polohy, dráhy a jejich derivací -1. *Kts.tul.cz* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Snimace_polohy_a_drahy_1.pdf
- [7] EBBESSON, Christer. *Rotary Position Sensors: Comparative study of different rotary position sensors for electrical machines used in an hybrid electric vehicle application*. Lund (Sweden): Faculty of Engineering, Lund University, 2011.
- [8] KADANÍK, Petr. *Resolver-to-Digital Module*. Prague: Gerstner Lab, © 2003.
- [9] Princip - Encoder. *Pohonnatechnika.cz* [online]. © 2007-2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/encodery>
- [10] RIPKA, P., S. ĎAĎO, M. KREIDL a J.NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-03123-0.
- [11] Selsyn – selfsynchron. *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/808>
- [12] Snímače polohy - selsyny. *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1578>
- [13] JEHLÁŘ, Zbyněk. *Vliv externích magnetických polí na funkci snímačů otáček*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [14] LACKO, B., L. MAIXNER, P. BENEŠ a L.ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika* [online]. Praha: Computer Press, 2000 [cit. 2018-04-27]. ISBN: 80-7226-246-7. Dostupné z: http://static.eplanet.sk/files/9788025125236_01.pdf
- [15] VOJÁČEK, Antonín. *El. motory a jejich řízení - základní přehled - 2.díl. Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/el-pohony-komponenty/el-motory-a-jejich-řízení-2díl-principy-řízení.html>
- [16] PROCHÁZKA, Karel. *Měření otáček*. *spsu-opava.cz* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: http://www.spsu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_IV/VY_52_INOVACE_J-06-20.pdf

- [17] ELEKTROMOTORY ATAS. Tachodynamo, tachogenerátory. Ložiska Vokoun [online]. © 2009 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.loziska-vokoun.cz/elektromotoryatas/tachodynamo-tachogenerator>
- [18] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. Princip. *Automatizace.hw.cz* [online]. 23. 11. 2007 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [19] ŠTĚTINA, J., M. JAROŠ a P. RAMÍK. Virtuální laboratoř – Měření: Měření snímače, metody. *ottp.fme.vutbr.cz* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-07.htm>
- [20] Snímače polohy – kapacitní. *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1579>
- [21] Snímač polohy CPT 1A. *Dicont.cz* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.dicont.cz/snimace-polohy.php?id=1>
- [22] AJP – TECH. Kapacitní snímače. *Ajptech.cz* [online]. © 2009-2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslove-senzory/baumer-senzory/snimace/kapacitni-snimace/>
- [23] ELECTRONICS TUTORIALS. Position Sensors. *electronics-tutorials.ws* [online]. © 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_2.html
- [24] AJP – TECH. Inkrementální enkodéry. *Ajptech.cz* [online]. © 2009-2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslove-senzory/baumer-senzory/snimace/snimace-otacek-a-uhlu/inkrementalni-enkodery/>
- [25] Senzory: Optický inkrementální senzor. *Senzory.aspone.cz* [online]. 2012 [cit. 2018-05-2]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ois.htm>
- [26] Kód pro inkrementální snímače. *Plc-automatizace.cz* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/IRC-code.htm>
- [27] Jednostopý grayův kód. *Plc-automatizace.cz* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/single-track-gray-code.htm>
- [28] Grayův kód (vícestopý, absolutní). *Plc-automatizace.cz* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/data/kodovani/gray-code.htm>
- [29] LARM. Incremental rotary encoders IRC300-325. *Larm.cz* [online]. [cit. 2018-05-10]. Datasheet. Dostupné z: http://www.larm.cz/templates/larm/data/82_irc300-325gb.pdf
- [30] DIGILENT. *Digilent Basys2 Board Reference Manual*. Digilent, listopad 2010.
- [31] TEXAS INSTRUMENTS. AM26LV32 Low-Voltage, High-Speed Quadruple Differential Line Receiver. *ti.com* [online]. Texas Instruments, říjen 2017 [cit. 2018-05-10]. Datasheet. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/am26lv32.pdf>

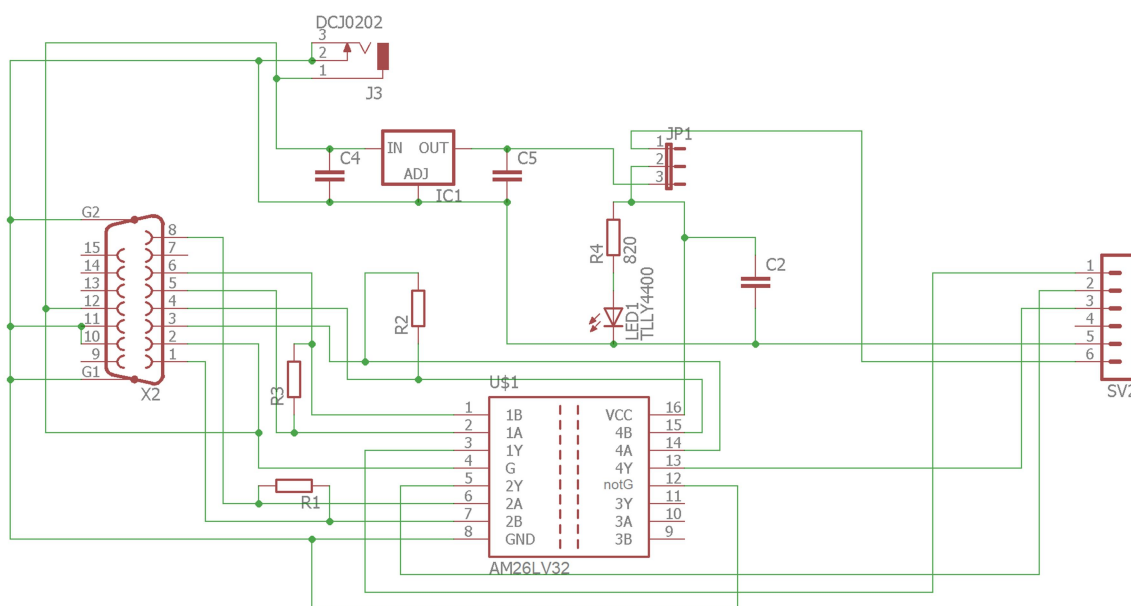
- [32] STMICROELEKTRONICS. LD1117 Series Low Drop Fixed and Adjustable Positive Voltage Regulators. *Sparkfun.com* [online]. STMicroelectronocs, prosinec 2005 [cit. 2018-05-10]. Datasheet. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LD1117V33.pdf>
- [33] Double Dabble. *Wikipedia: the free encyklopedia* [online]. Naposled upraveno 17. ledna 2018 [cit. 16-05-2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Double_dabble

A PŘÍLOHA – NÁVRH ROZHRAŇÍ

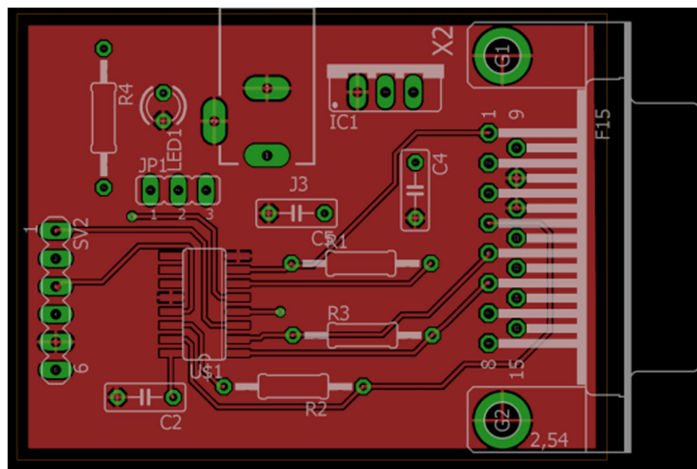
A.1 Seznam použitých součástek

Součástka	Značka ve schématu	Parametr	Pouzdro
Diferenciální přijímač	AM26LV32D	U1	SOIC-16
konektor Canon 15-pin		X2	90° do DPS
Stabilizátor napětí	LD1117V33	IC1	3,3 V
konektor Header 6-pin	S1G10W	SV2	2,54 mm
konektor Jack	PC-GK2,1	J3	2,1 mm vidlice
Jumper - oboustranný kolík		J1	2,54 mm
LED červená	L-53LSRD	LED1	2 mA/1,85 V
Kondenzátor	Y5V	C2	100 nF
Kondenzátor	Y5V	C4	100 nF
Kondenzátor	YHC-CA42	C5	10 μ F
Odpor		R1	120 Ω
Odpor		R2	120 Ω
Odpor		R3	120 Ω
Odpor		R4	820 Ω

A.2 Schéma rozhraní mezi čidlem a vývojovou deskou

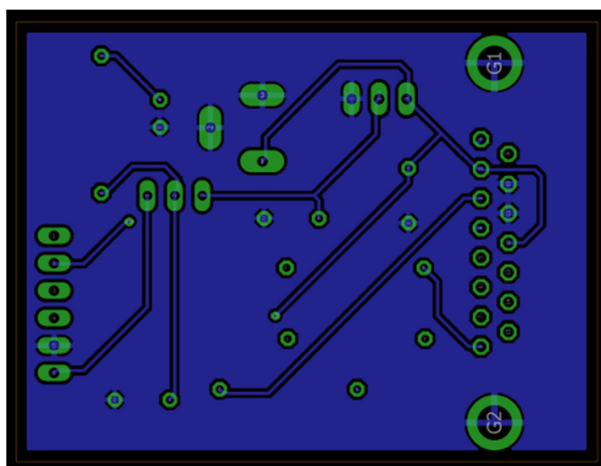


A.3 Deska plošného spoje rozhraní – vrchní strana (top)



Rozměr desky 53,8 x 40,7 [mm]

A.4 Deska plošného spoje rozhraní – spodní strana (bottom)



Rozměr desky 53,8 x 40,7 [mm]

B PŘÍLOHA – NÁVRH DEKODÉRU (CD)

CD je vloženo na vnějších deskách.