

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj otáčkoměru pro elektrický pohon

Autor: David Bartůněk

2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David BARTŮNĚK**
Osobní číslo: **E17B0065P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Vývoj otáčkoměru pro elektrický pohon**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

Předmětem bakalářské práce je návrh, výroba, naprogramování a zprovoznění digitálního otáčkoměru k elektrickému pohonu. Otáčkoměr bude vyhodnocovat otáčky a polohu motoru změřené inkrementálním čidlem (IRC) a zobrazovat je na displeji.

1. Provedte stručnou rešerši principů měření otáček a polohy.
2. Navrhněte schéma zapojení a desku plošných spojů otáčkoměru.
3. Vytvořte software pro vyhodnocení otáček a jejich zobrazení na displeji.
4. Rozšiřte software o možnost nastavení rozlišení čidla a přepínání mezi měřením otáček a polohy.
5. Ověřte funkčnost otáčkoměru na elektrickém pohonu.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Záhlava, Vít: Návrh a konstrukce DPS: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN – technická literatura, 2010
2. Herout, Pavel: Učebnice jazyka C. – 1. díl. České Budějovice: Kopp, 2009

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Kroneisl**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

Abstrakt

V bakalářské práci jsou nejprve popsány senzory pro měření otáček a úhlu natočení. Dále je pozornost věnována vývoji hardwaru pro IRC senzor, výběru vhodných komponent a jejich zapojení. Přenos signálu mezi senzorem a mikrokontrolérem je uskutečněn pomocí RS422 sběrnice. Dále se zde nachází popis softwaru pro mikrokontrolér a výpočet důležitých hodnot pro správnou funkci. Najdeme zde také ověření funkčnosti na elektrickém pohonu.

Klíčová slova

otáčkoměr, IRC, RS422, senzory

Abstract

In the bachelor theses the sensors for measuring speed and angle are described. Furthermore, the work focuses on the development of hardware for IRC sensor, by selecting suitable components and their connections. The signal transmission between the sensor and the microcontroller is carried out using the RS422 bus. There is also a description of the software for the microcontroller and the calculation of important values for proper operation. There is also a verification of functionality on the electric drive.

Key words

speed sensor, IRC, RS422, sensor

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2020

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Kroneislovi za metodické vedení, cenné profesionální rady a připomínky při vypracování práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	12
1 SENZOR	13
2 SENZORY ÚHLOVÉ RYCHLOSTI A ÚHLU NATOČENÍ	14
2.1 OPTOELEKTRONICKÉ SENZORY	14
2.1.1 Inkrementální senzor	14
2.1.2 Absolutní senzor	20
2.2 INDUKČNÍ SENZORY.....	22
2.2.1 Selsyn.....	23
2.2.2 Resolver	23
2.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SENZORY	25
2.3.1 Tachodynamo	25
2.3.2 Tachogenerátor	25
3 NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ	27
3.1 ZDROJ NAPĚTÍ	28
3.2 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM.....	29
3.3 NABÍJEČKA.....	29
3.4 DC/DC MĚNIČ.....	30
3.5 PŘIJÍMAČ RS422 A EXTERNÍ SOUČÁSTI SBĚRNICE	31
3.6 MIKROKONTROLÉR	33
4 PROGRAM PRO MIKROKONTROLÉR	35
4.1 DIREKTIVY PŘEKLADAČE	35
4.2 QUADRATURE ENCODER INTERFACE (QEI).....	35
4.2.1 Přerušení pro QEI	37
4.2.2 Výpočet filtru, inicializace QEI a digitálního filtru	37
4.2.3 Výpočet úhlu a otáček.....	38
4.3 LCD.....	40
5 VÝROBA DPS A KONSTRUKCE KRABÍČKY	41
5.1 VÝROBA DPS	41
5.2 VÝROBA KRABÍČKY.....	41
6 TESTOVÁNÍ	42
6.1 POUŽITÝ IRC SENZOR	42
6.2 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ	42
7 ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44
PŘÍLOHY	I

Seznam symbolů a zkratk

A/D	Analogové digitální převodník (Analog to Digital converter)
MCU	Mikroprocesorová jednotka (Microcontroller unit)
IRC	Inkrementální rotační snímač (Incremental Rotary Encoders)
CNC	Počítačové řízení (Computer Numeric Control)
EDA	Automatizace elektronického systému (Electronic Design Automation)
DPS	Deska plošných spojů
BMS	System správců baterií (Battery Management System)
ESD	Ochrana proti elektrostatickému výboji (Electrostatic Discharge)
QEI	Rozhraní pro kvadrurní kódování (Quadrature Encodare Interface)
PLA	Kyselina polymléčná (Polylactic Acid)

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1: BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘÍCIHO ŘETĚZCE IRC	13
OBR. 2: JEDNOTLIVÉ ČÁSTI INKREMENTÁLNÍHO ROTAČNÍHO SENZORU.....	15
OBR. 3: KÓDOVACÍ DISK.....	16
OBR. 4: MĚŘENÍ POMOCÍ VYSOKOFREKVENČNÍCH HODIN [4]	17
OBR. 5: VÝSTUPNÍ SIGNÁL Z INKREMENTÁLNÍHO SENZORU PŘI RŮZNÉM SMĚRU OTÁČENÍ....	17
OBR. 6: LINKOVÝ BUDIČ S OTEVŘENÝM KOLEKTOREM NPN	19
OBR. 7: LINKOVÝ BUDIČ PUSH/PULL	19
OBR. 8: DIFERENČNÍ LINKOVÝ BUDIČ (RS 422).....	20
OBR. 9: KÓDOVACÍ DISK S BINÁRNÍM A S GRAYOVÝM KÓDEM.....	21
OBR. 11: ZAPOJENÍ SE DVĚMA SELSYNY [11].....	23
OBR. 12: RESOLVER NAPÁJEN DO ROTOROVÉ ČÁSTI [13].....	24
OBR. 13: RESOLVER NAPÁJEN DO STATOROVÉ ČÁSTI [13]	24
OBR. 14: BLOKOVÉ SCHÉMA NAPÁJENÍ.....	27
OBR. 15: BLOKOVÉ SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU.....	28
OBR. 16: SCHÉMA ZAPOJENÍ NABÍJECÍHO OBVODU PRO LI-ION	30
OBR. 17: SCHÉMA ZAPOJENÍ DC-DC MĚNIČE	31
OBR. 18: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘIJÍMAČE RS422 S TVS DIODY A TERMINÁTORY	32
OBR. 19: SCHÉMA ZAPOJENÍ MCU	34
OBR. 20: BLOKOVÉ SCHÉMA QEI MODULU [23]	36
OBR. 21: 4 UŽIVATELSKY PŘÍSTUPNÉ REGISTRY QEI MODULU [23]	36
OBR. 22: VÝSLEDNÉ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	43

Seznam tabulek

TABULKA 1: PŘECHODY SIGNÁLU PŘI OTÁČENÍ DOPRAVA A DOLEVA	18
TABULKA 2: TABULKA BINÁRNÍHO A GRAYOVA KÓDU	22
TABULKA 3: VLASTNOSTI MIKROKONTROLÉRU	33
TABULKA 4: TESTOVANÝ POHON.....	42

Úvod

Důležitou součástí dnešních moderních automatizovaných soustav a zařízení jsou senzory. Senzor je zařízení, které na svém vstupu detekuje nějakou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu. Vstupní veličina se tak v senzoru přemění na jinou formu, například na elektrický signál. Signál dále můžeme zobrazit na displeji, zaznamenat ho, nebo ho použít jako zpětnou vazbu do regulace.

S příchodem mikroelektroniky se mezi nejpoužívanější senzory na měření otáček a úhlu natočení zařadily senzory optoelektronické. Mezi ně patří jak senzory inkrementální, tak absolutní. S oběma typy se můžeme setkat v různých odvětvích, ať je to strojírenský průmysl, dopravní prostředky, robotika, automatizace, nebo lékařství.

K důležitosti senzorů otáček a úhlu natočení je tato práce tvořena rešerší, která je věnována základnímu popisu práce senzorů optoelektronických, indukčních a elektrodynamických. Dále se práce zabývá vyhodnocením dat z jednotlivých senzorů a jejich zpracování.

V praktické části se věnuji vytvoření zařízení, které bude měřit a zobrazovat otáčky a úhel natočení elektrického pohonu. Zařízení bude provozováno na baterii a bude umístěno ve vhodně zkonstruované krabičce. Praktická část tak obsahuje návrh schématu, návrh a osazení DPS, jeho oživení. Dále se zde bude popsána konstrukce krabičky, ve kterém bude DPS umístěna, tvorba a ladění programu. Nakonec bude zařízení otestováno na elektrickém laboratorním pohonu.

1 Senzor

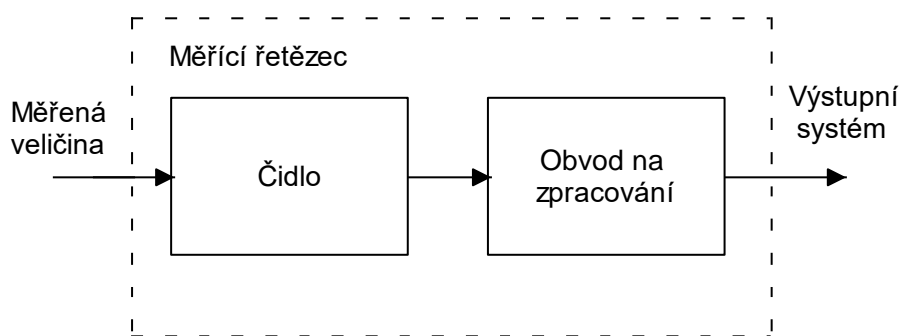
Senzor je zařízení (součástka), která umožňuje měřit určitou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a převádět jí na jinou veličinu. Většinou na elektrický signál.

Senzory dělíme do několika skupiny podle hlediska, jak o nich uvažujeme:

- a) Podle výstupní signálu
- b) Podle vstupní veličiny
- c) Podle styku s měřeným prostředím
- d) Podle výrobní technologie
- e) A další

V této práci se budeme na senzory dívat z pohledu výstupního signálu. Výstupní signál může být analogový (např. tachodynamy, selsyny, resolvery) nebo digitální (inkrementální senzory, kapacitní).

Senzor se skládá z jednoho a více bloků, který jako celek tvoří měřicí řetězec. Na vstupu senzoru najdeme čidlo. Čidlo je součástka, která se stará o převod měřené veličiny na veličinu elektrickou. Tento převod je většinou spojitý, nebo impulzní. Dalším blokem, který může obsahovat senzor, je obvod na zpracování signálu. V tomto bloku můžeme docházet k zesílení signálu, jeho převedení na digitální pomocí A/D převodníku, filtraci a další (signal conditioning). Některé senzory také obsahují MCU a komunikační rozhraní, které kóduje výstup podle zavedených protokolů např. CAN, ProfiBus, Ethernet a jiné. Na Obr. 1 můžeme vidět blokové schéma měřicího řetězce IRC senzoru.



Obr. 1: Blokové schéma měřicího řetězce IRC

Dnes jsou celé řady automatizovaných systémů závislé na informaci o rotačním nebo lineárním pohybu, proto se neobejdeme bez senzorů, které vyhodnocují úhlovou rychlost, úhel natočení nebo vzdálenost. Tyto senzory mohou být analogové nebo digitální.

Při výběru senzoru bereme největší zřetel na rozlišení senzoru. Dalšími parametry, které nás zajímají jsou rozměry, použitá technologie, odolnost, cena atd.¹

¹ Dalšími parametry může být maximální otáčky, délka přenosového média, teplotní rozsah, nebo konstrukce uchycení.

2 Senzory úhlové rychlosti a úhlu natočení

2.1 Optoelektronické senzory

Optoelektronické senzory neboli senzory fotoelektronické, jsou dnes nejvíce používané senzory v průmyslové automatizaci. Nejčastěji je najdeme ve zpětné vazbě regulace, nebo v aplikacích, kde nám dávají pouze informaci o stavu měřeného pohonu.

- **Základní vlastnosti**

Mezi základní vlastnosti optoelektronických senzorů, patří přeměna světla na jinou formu energie např. na elektrické napětí. Tato přeměna je duální², tudíž můžeme tento proces uskutečnit i zpětně. Vlnové délky světla nabírají hodnoty o velikosti λ od 0,3 do 1,2 μm . [1]

Jako zdroj světla byly dříve používány obyčejné žárovky. Jako přijímač se používaly fotoodpory. Dnes s příchodem polovodičové techniky a potřebě velmi přesné informace se začali používat vysílací prvky LED diody, nebo laserové diody. Pro příjem používáme fotodiody, fototranzistory nebo diody s laterálním efektem³. [1]

2.1.1 Inkrementální senzor

Inkrementální senzory neboli přírůstkové senzory patří do skupiny optoelektronických senzorů. Ty lze dělit na dva základní typy podle jejich použití a to na: lineární inkrementální kodéry, které detekují lineární pohyb a kodéry rotační, které dokážou detekovat rotační pohyb. V obou těchto případech, jsou jejich výstupní signály totožné. [2]

- **Konstrukce**

Konstrukce inkrementálního rotačního kodéru je tvořena z několika částí. Jádrem kodéru je pohyblivý kódovací disk s hřídelí, na kterém se nacházejí 3 masky. Dvě masky obsahují rysky, které jsou proti sobě pootočené o 90° elektrických. Třetí maska obsahuje pouze jednu rysku, která slouží jako referenční hodnota hřídele. Rysky jsou pro světlo průhledné nebo reflexní. Kódovací disky jsou umístěny mezi zdroj a přijímač světla. O napájení polovodičových součástek, vyhodnocování stavů a invertování výstupů se stará elektronika. Celý senzor je uschován v krytu s výstupními konektory⁴. Kryt slouží k větší odolnosti zařízení, k nepropustnosti vody, prachu (IPxx) a k větší pevnosti. Z druhé strany se nachází ložiskové pouzdro, kterým prochází hřídel, která obstarává roztočení kódovacího

² Duálním se myslí, že pomocí elektrické energie vygenerujeme světlo ve zdroji světla, které pak pomocí světelného přijímače převedeme zpět na elektrickou energii

³ Dioda s laterálním efektem neboli PSD je varianta PIN diody. Tato dioda se využívá v náročných aplikacích například u triangulační metody měření [1]

⁴ Jako přenosové médium se u optických senzorů používá kroucená dvojlinka. Ta je díky svému geometrickému uspořádání velmi odolná vůči elektromagnetickému rušení

disku. Ložiskové pouzdro také slouží k upevnění na měřený pohon⁵. Zobrazená konstrukce viz. *Obr. 2.*[3]



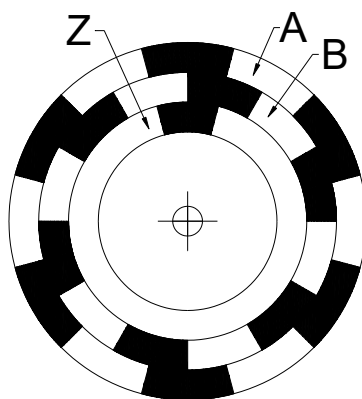
Obr. 2: Jednotlivé části inkrementálního rotačního senzoru

• Princip

Inkrementální senzory pracují na principu clonění nebo reflexe světelného toku. Aby bylo možné zaručit dostatečnou přesnost, je nutné mezi zdroj a optický přijímač vložit pohyblivý kódovací disk a pevnou mřížku. Při otáčení pohyblivého kotouče proti pevné mřížce vznikají na fotodetektorech sinusové⁶ průběhy **A** a **B**, které jsou fázově posunuté o 90°. Signály jsou dále přivedeny na vstupy komparátorů, kde jsou převedeny na signály pravoúhlé. Tímto posuvem rozeznáváme, na jakou stranu se hřídel otáčí. Některé inkrementální kodéry také produkují signál **INDEX** (někdy označován jako **Z**). Tento signál se skládá pouze z jediného impulzu, který se vyskytuje v referenční poloze hřídele a je většinou synchronní s výstupním signálem **A** nebo **B**. Při přivedení napájení do senzoru nelze určit v jaké poloze se hřídel nachází. Pomocí signálu **INDEX** tak můžeme senzor zorientovat. [3]

⁵ Upevnění senzorů může být buď pomocí vlastní hřídele, která je připevněna na hřídel pohonu „shaft“, nebo vestavěné, kterou lze použít v libovolném místě pohonu „build in“

⁶ Harmonický signál je způsoben tím, že hrany rysek nejsou absolutně ostré a nedokáží úplně zakrýt světlo.



Obr. 3: Kódovací disk

• Měření rychlosti, směru otáčení a úhlu natočení

Nejběžnější využití kodérů je měření úhlové rychlosti nebo vzdálenosti. Měření je možné, protože existuje lineární vztah mezi pulzní frekvencí kodéru a rychlostí jeho otáčení. Jinými slovy, jestliže se kodér otáčí rychleji, roste tak stejnou rychlostí frekvence pulzů. Rychlost pak můžeme určit pomocí dvou způsobů, buď počítáním pulzů za vzorkovací periodu, nebo měřením pomocí vysokofrekvenčních hodin. U obou těchto metod nám vystačí pouze jeden výstupní signál.[4]

Počítání pulzů využívá periodu vzorkování (T) a počet impulzů (n). Během periody vzorkování se čítá počet impulzů (n), které přicházejí od kodéru a ze kterých se pak stanoví frekvence impulsů (n/T). Jestliže také známe počet pulzů na otáčku (N), můžeme pomocí vztahu viz.1 vypočítat úhlovou rychlost. Tento princip měření se využívá ve vysokorychlostních aplikacích.[4]

$$\omega = \frac{2\pi n}{NT} \quad 1$$

Kde:

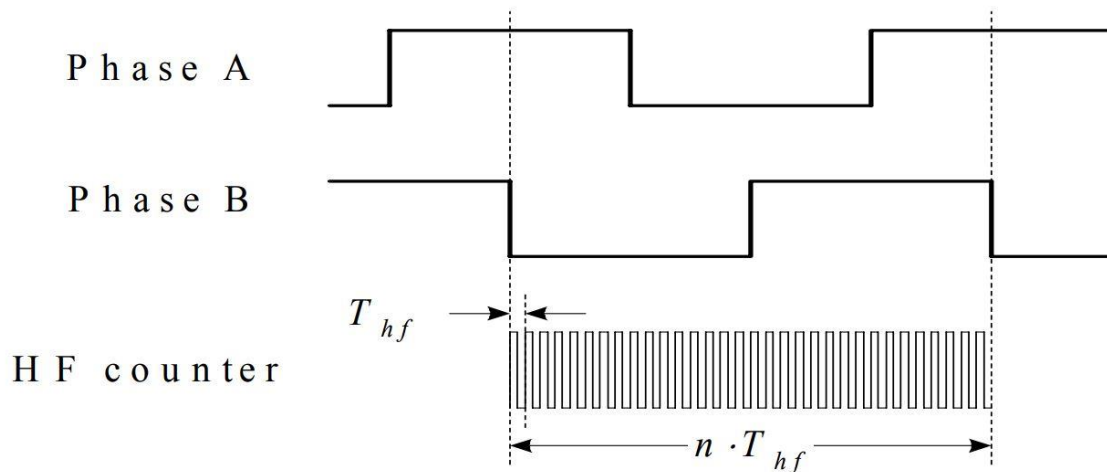
ω	úhlová rychlost (rad/s)
n	počet načítaných pulzů
T	dobra periody (s)
N	maximální počet pulzů na otáčku

Měření pomocí frekvence využívá signál vysokofrekvenční hodin (f_{hf}). Měření probíhá tak, že během jedné periody měřeného signálu se nasčítají periody (n) vysokofrekvenčních hodin a pomocí počtu pulzů na otáčku (N) se viz. 2 vypočítá úhlová rychlost. Tato metoda se používá při nízkých rychlostech.[4]

$$\omega = \frac{2\pi f_{hf}}{Nn} \quad 2$$

Kde:

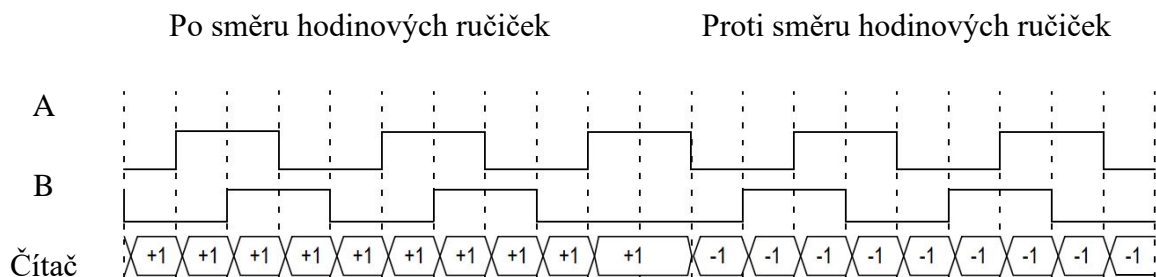
- ω úhlová rychlost (rad/s)
- f_{hf} frekvence vysokofrekvenčních hodin (Hz)
- n počet načítaných period za jeden impuls
- N počet pulzů na otáčku



Obr. 4: Měření pomocí vysokofrekvenčních hodin [4]

Ke stanovení směru otáčení se využívá princip obou výstupních signálů **A**, **B**, které jsou vzájemně posunuty o 90° . Z Obr. 5 a Tabulka 1 můžeme vidět princip určování směru otáčení. [5]

K určování polohy nám slouží synchronní čítač, který čítá nahoru a dolů. Jestliže se kodér pohybuje v jednom směru, stav čítače se zvyšuje, jestliže se pohybuje v druhém směru, stav čítače se snižuje. To nám dává v každém okamžiku polohu mechanického systému označenou aktuálním stavem čítače viz Obr. 5.[5]



Obr. 5: Výstupní signál z inkrementálního senzoru při různém směru otáčení

Tabulka 1: Přechody signálu při otáčení doprava a doleva

Směr otáčení	A	B
Po směru hodinových ručiček →	1	0 → 1
	1 → 0	1
	0	1 → 0
	0 → 1	0
Proti směru hodinových ručiček ←	0 → 1	1
	1	1 → 0
	1 → 0	0
	0	0 → 1

• Výstupy

Kromě základních výstupních signálů A , B a Z , můžeme najít u senzorů, také jejich signálové negace \bar{A} , \bar{B} , \bar{Z} . Tyto negace jsou zde proto, abychom mohli provádět kontrolu správnosti signálů a zjistit tak, případnou závadu přívodního kabelu nebo chybu senzoru. IRC je většinou umístěn na elektrickém měřeném pohonu, od kterého vzniká elektromagnetické rušení. Tento typ rušení se následně indukuje do přenosového média a může tak zkreslit výstupní signál ze senzoru. Abychom předešli k těmto chybám, můžeme vhodně; zapojit výstupní obvod.

○ Otevřený kolektor NPN

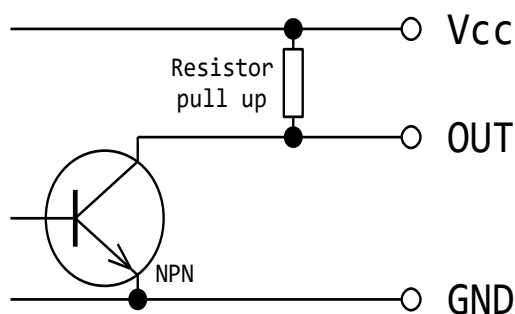
Tento typ výstupu se skládá z tranzistoru NPN⁷ a pull-up rezistoru. Rezistor je většinou už implementován v MCU, kde ho pomocí softwaru povolíme. Jestliže chceme pull-up rezistor přidat do obvodu, tak jeho typické hodnoty jsou řádově k Ω .

Princip otevřeného kolektoru spočívá v tom, že přivedeme log 0 na bázi tranzistoru, ten bude zavřený a na výstupu se objeví pomocí pull-up rezistoru napětí Vcc. Jestliže na tranzistor přivedeme log 1, tranzistor se otevře a výstup se spojí do země.

Výhody takového zapojení spočívají v tom, že můžeme připojovat různá zařízení odlišných napěťových hladin. Nevýhody tohoto zapojení je v jeho vysoké spotřebě⁸. Dále tento výstup není vhodný použít pro delší kabelové trasy, kde se vyskytuje elektromagnetické rušení. Nelze ho také využít při vysokých frekvencích. Schéma zapojení viz. *Obr. 6*

⁷ Dnes se výhradně používají tranzistory unipolární

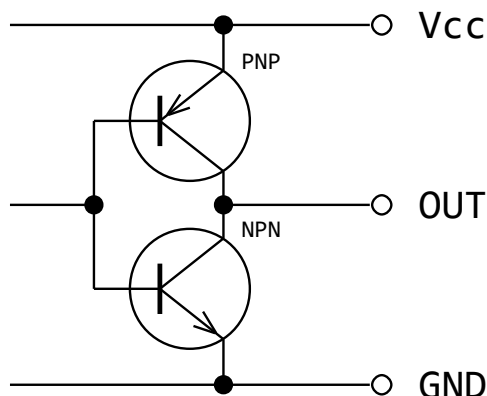
⁸ Spotřeba je zapříčiněna pull up rezistorem, na kterém vzniká výkonová ztráta



Obr. 6: Linkový budič s otevřeným kolektorem NPN

○ PUSH/PULL

Princip je podobný otevřenému kolektoru. Při přivedení log 0 na vstupy tranzistorů⁹, se tranzistor PNP otevře a stáhne napájecí napětí Vcc na výstup. Jestliže přivedeme log 1 na vstupy tranzistorů, otevře se pouze tranzistor NPN a výstup stáhne k potenciálu země¹⁰. Jelikož se v zapojení nevyskytují žádné rezistory, které by spotřebovávali energii. Obvod je vhodný pro low-power zařízení.[6]



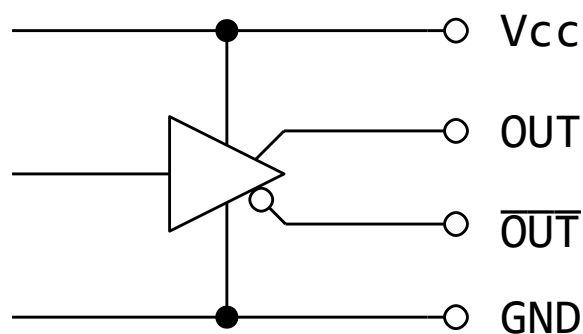
Obr. 7: Linkový budič push/pull

○ Diferenční linkový budič (RS422)

Princip je založen na přenosu dat pomocí dvou vodičů, kde zjišťování hodnoty bitu určuje rozdíl potenciálu mezi vodiči, ale nikoliv mezi vodičem a společným vodičem zemí. Důvod, proč se takto data vysílají, je v jejich odolnosti vůči rušení. V kabelu se také mohou data přenést vysokou rychlostí až 10 Mbit/s. Takovéto zapojení je vhodné pro delší kabelové trasy dosahující až 1500 m. Jako fyzické médium se pro přenos používá kroucená dvojlinka.[7]

⁹ Dnes se výhradně používají tranzistory unipolární

¹⁰ Při otvírání a zavírání tranzistorů dochází ke stavu kdy, jeden tranzistor je zcela otevřen a druhý není zcela zavřen, což vede k proudové špičce z napájení přes oba tranzistory.



Obr. 8: Diferenční linkový budič (RS 422)

• Základní parametry

Základním parametrem je počet pulzů na 1 otáčku. Řádově jsou to tisíce až jednotky deseti tisíc. Tento parametr je omezen z důvodu použité technologie, protože počet pulzů je dán drážkami kódového kotouče a ty mají své limity. Počet pulzů můžeme také zvětšit až 4x jestliže zapojíme vhodně vyhodnocovací techniku, kde budeme nejenom vyhodnocovat napěťové úrovně, ale také jejich vzestupné a sestupné hrany.

Důležitým parametrem jsou maximální otáčky za minutu, napájecí napětí, výstupní obvod, nebo v jakém prostředí bude IRC senzor pracovat.

• Použití v praxi

S inkrementálním senzorem se můžeme setkat tam, kde chceme znát s velkou přesností úhlovou rychlost nebo úhel natočení a nezajímá nás okamžitá poloha při přivedení napájení.

Informace o úhlové rychlosti a úhlu natočení se nám může hodit u CNC strojů kde chceme znát rychlost otáček fréz, soustruhů, asynchronních pohonů nebo v automobilovém odvětví kde snímáme rychlost auta¹¹. IRC senzor je také levnější¹² než senzor absolutní, který se také často využívá.

2.1.2 Absolutní senzor

Absolutní senzor patří do skupiny optoelektronických senzorů. Jeho konstrukce je stejná, jako konstrukce inkrementálního, kromě kódového disku, který má jinak rozložené masky s ryskami. Hlavním výhodou absolutního senzoru je, že poskytuje pro každou úhlovou polohu určitou číselnou hodnotu. Tato hodnota může sloužit k okamžitému zjištění polohy při výpadku napájení a k bezproblémovému chodu automatizovaného zařízení, kde je hlavní role poloha. Senzor tedy může předat informace o poloze ihned po svém zapnutí.

¹¹ IRC senzory se většinou používají jako snímače rychlosti, k měření polohy je většinou použit snímač jiný.

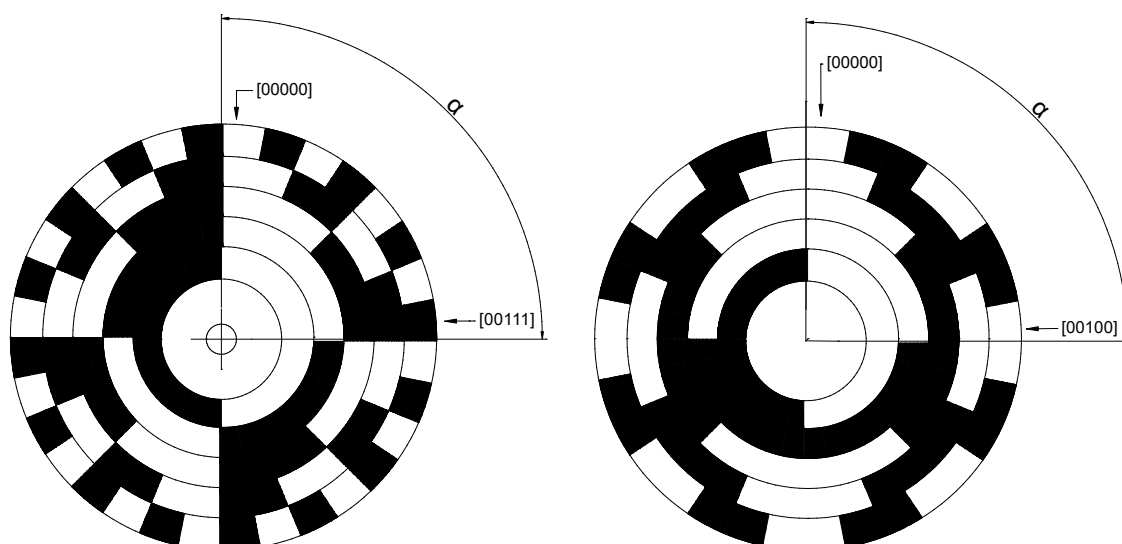
¹² IRC senzor je levnější oproti absolutnímu díky jednodušší konstrukci kódovacího kotouče

- **Konstrukce kódového disku**

Konstrukce kódového disku je na rozdíl od disku inkrementálního v porovnání o dost složitější. Rysky jsou rozloženy v několika řadách podle toho, kolika bitový kódovací kotouč máme viz. Obr. 9. Obrázky vyobrazují rozdělení rysek pomocí binárního kódu a pomocí Grayova kódu.

Grayův kód využíváme pro jeho vysokou odolnost vůči chybám. Jelikož se vždy mění pouze jeden bit stavu, tak nemůže dojít k nesprávnému vyhodnocení polohy při přechodu. Každý řádek na kódovém disku obsahuje vlastní fotodetektor. Rozlišení je vyjádřeno jako počet bitů, které odpovídají počtu jedinečných slov na jednotku otáčky.

Pro senzory s rozlišením do 10 bitů lze použít jednoduchou clonku pro každý bit. Nad tuto hodnotu musíme použít jinou metodu vyhodnocení. Pro vyšší hodnoty můžeme například použít kotouč se speciálním kódováním a integrovaný obvod pro dekódování polohy.[8][9]



Obr. 9: Kódovací disk s binárním a s Grayovým kódem

- **Měření úhlu natočení**

Princip měření úhlu spočívá v tom, že každý bod na dráze má svoji unikátní hodnotou. Rozlišení můžeme také udávat jako počet řádků na kódovacím kotouči. Jestliže máme 10-bitový senzor ($N = 1024$ stavů), můžeme tak rozeznat úhel o minimálním rozlišení o $0,35^\circ$ viz. 3. Rozložení 4 bitového senzoru můžeme vidět v *Tabulka 2*. [8][9]

$$\varphi = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{1024} = 0,35^\circ \quad 3$$

Kde:

φ [°] minimální krok

N N je počet stavů na kódovacím kotouči

Tabulka 2: Tabulka binárního a Grayova kódu

Binární kód				
	x3	x2	x1	x0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Grayův kód				
	x3	x2	x1	x0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	1
7	0	1	0	0
8	1	1	0	0
9	1	1	0	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	0
12	1	0	1	0
13	1	0	1	1
14	1	0	0	1
15	1	0	0	0

• Použití v praxi

Tento typ senzoru se používá v aplikacích, kde by ztráta polohy mohla vést ke zranění osoby, poškození stroje, nebo kde potřebujeme znát polohu hned po zapnutí napájení. Tento senzor musíme použít také u synchronního pohonu, kde potřebujeme znát natočení rotoru vůči statoru, abychom mohli správně synchronní motor nabudit.

Absolutní senzory mají také dobrou odolnost vůči elektromagnetickému rušení. V praxi se můžeme setkat například s 10, 13, 24, nebo 25 bitovými senzory.[8][9]

2.2 Indukční senzory

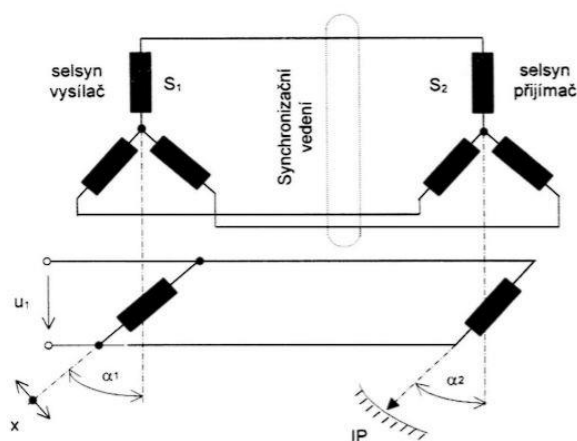
Princip indukčních senzorů je založen na převodu polohy na vlastní indukčnost (tlumivkové senzory), nebo vzájemnou indukčnost (transformátorové senzory). Indukční senzory patří do skupiny bezkontaktních, proto jsou vhodné do aplikacích, kde vznikají vysoké vibrace. Senzory založené na indukci jsou také vhodné pro měření zrychlení. Z elektrického pohledu můžeme senzory dělit na indukční senzory s vestavěnou elektronikou, které mají standardizovaný výstup, nebo bez elektroniky, které vyžadují externí elektroniku.[10]

2.2.1 Selsyn

Selsyn neboli synchro, je senzor, který se často využíval k měření úhlu natočení točivého stroje. Jelikož jeho princip spočívá v bezkontaktním měření, tak je vhodný pro měření v aplikacích, kde vznikají velké vibrace.

- **Konstrukce a princip**

Selsyn je konstruován jako malý elektrický stroj. Primární vinutí je připevněno k rotoru a je buzeno střídavým proudem, který pomocí elektromagnetické indukce naindukuje napětí ve třech sekundárních vinutích. Ta jsou připevněna na stator. Vinutí, která se nacházejí na statoru jsou zapojeny do hvězdy a jejich natočení vůči sobě je 120° . Měření velikosti napětí sekundárním vinutím, nám poté dává informaci o natočení úhlu rotoru vzhledem ke statoru. Nejčastějším zapojením je spojení 2 selsynů, kde jeden je vysílač a druhý přijímač. Jestliže se vysílací selsyn potočí o určitý úhel, indukuje se v jeho statoru napětí, které pak vygeneruje magnetické pole v přijímacím selsynu a rotor se otočí o stejný úhel jako vysílací selsyn¹³. [10] [11]



Obr. 10: Zapojení se dvěma selsyny [11]

2.2.2 Resolver

Resolver je rotační elektrický transformátor, který se používá pro určování polohy a rychlosti. Jelikož se jedná o analogový indukční senzor, který neobsahuje žádnou elektroniku tak je vhodný do prostředí kde jsou vibrace, nečistoty, nebo kde jsou vysoké výkyvy teplot.

¹³ Dříve byli selsyny využívány například u filmových zařízení, nebo ve válečných lodích, kde byli použity ke kormidlování. Dnes všechny tyto aplikace nahradili digitální senzory.

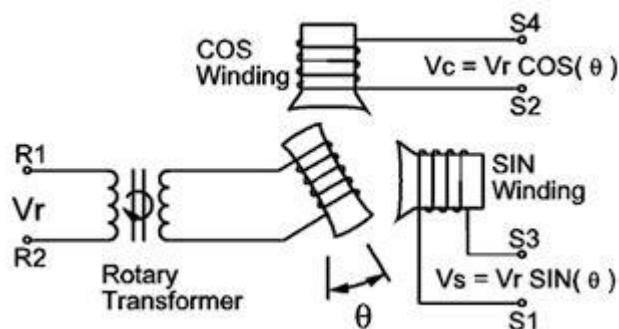
• Konstrukce a princip

Resolver je speciální druh rotačního transformátoru, který se podobá bezkartáčovému elektrickému motoru. V senzoru jsou 3 vinutí, dvě z nich jsou umístěny na statoru a jsou vůči sobě posunutá o 90° (někdy nazývaná jako SINusové a COSinusové vinutí). Třetí vinutí se nachází na rotoru, který je spojen s hřídelí motoru, nebo jiného točivého stroje. Pro měření polohy existují dva principy. První princip je napájet senzor do rotorové části viz. *Obr. 11* a druhý princip napájet senzor do statorové části viz. *Obr. 12*. [12]

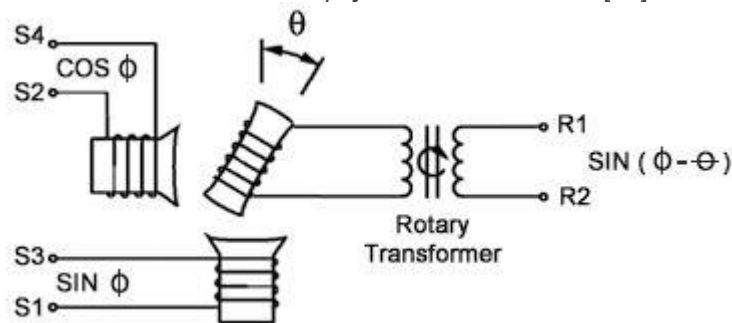
Při prvním principu je napájení přivedeno do rotorové části, kde se naindukuje napětí na SINusovém a COSinusovém vinutí nacházející se ve statorové části. Vzniklá amplituda napětí je závislá na funkci sinus a cosinus, nebo na poloze rotoru vzhledem k referenční poloze statorové části.[12]

Princip druhý spočívá v napájení resolveru do statorové části. Jestliže budeme napájet střídavým napětím, které je mezi sebou posunuta o 90° , vytvoří se magnetické pole, a v rotoru se naindukuje napětí. Napětí v rotorové části bude vůči statorovému napětí fázové posunuté o úhel natočení rotoru.[12]

K vyhodnocování polohy se využívají převodníky, které převedou sinusový a kosinusový signál na digitální jehož bitová délka je většinou okolo 10 až 16 bitů¹⁴. [12]



Obr. 11: Resolver napájen do rotorové části [13]



Obr. 12: Resolver napájen do statorové části [13]

¹⁴ Převedení je provedeno v A/D převodníku, kde se signál musí na vzorkovat, kvantovat a zakódovat

- **Použití v praxi**

Resolvery díky absenci elektroniky mají vyšší odolnost oproti senzorům inkrementálním. Díky jejich vyšší odolnosti se resolvery využívají v průmyslu, kde jsou náročné podmínky např. vibrace, radiace, elektromagnetické rušení. Velmi často jsou resolvery zabudovány přímo v elektrickém pohonu.

2.3 Elektrodynamické senzory

Elektrodynamické senzory byli nejčastěji používanou skupinou senzorů na snímání otáček, než je nahradili senzory optoelektronické. Jejich princip je založen na elektromagnetické indukci.

2.3.1 Tachodynamo

Tachodynamo je nejznámější elektrodynamický senzory úhlové rychlosti. Skládá se z permanentního magnetu, nebo elektromagnetu a kotvou vinutou. Konce vinutí jsou vyvedeny na komutátor.

Pokud se rotor otáčí, tak pomocí magnetické indukce se na vinutí naindukují napětí, které pomocí sběračů odebíráme. Velikost stejnosměrného napětí je úměrné otáčkám.

$$U = k \cdot \Phi \cdot \omega \quad 4$$

Kde:

U	napětí (V)
k	konstanta
Φ	budící magnetický tok (Wb)
ω	úhlová rychlost (rad)

Velikost výstupního napětí je závislá na konstrukci tachodynamu, jedná se o jednotky až stovky voltů. Nevýhodou tachodynamu jsou sběrače, protože mezi sběračem a komutátorem vzniká tření, které vede k rychlému opotřebování uhlíku. Výhodou je možnost určit směr otáčení a také veliký rozptyl výstupního napětí¹⁵. [10]

2.3.2 Tachogenerátor

Tachogenerátor patří do skupiny elektrodynamických senzorů úhlové rychlosti. Jeho konstrukce je se dá rozdělit na 2 typy. Jedním typem je indukční generátor s klecovou

¹⁵ Rozptyl může dosahovat až stovky voltů. Takto velký rozptyl nám vyhovuje kvůli elektromagnetickému rušení které dosahuje mV.

kotvou. Druhý typ je indukční generátor s bubínkovým rotorem, který byl spíše využíván, pro svůj malý moment setrvačnosti.

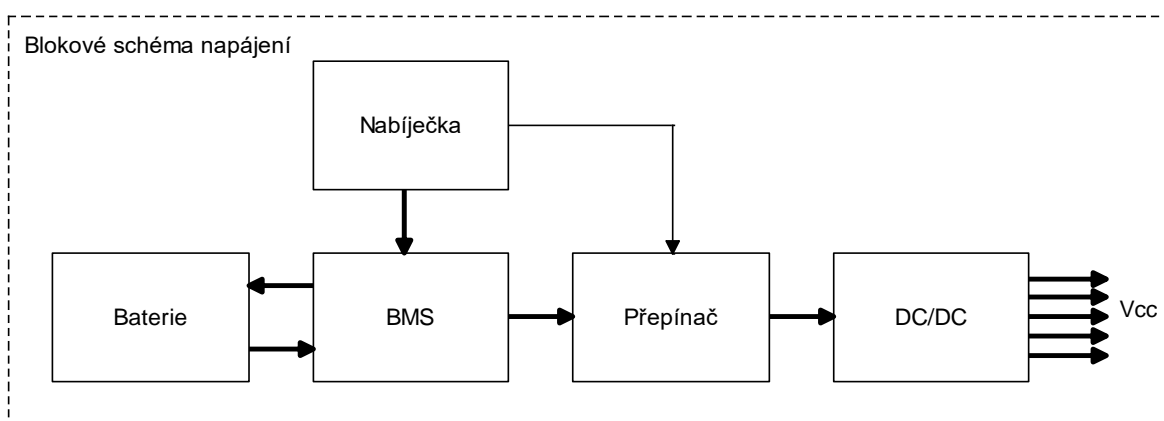
Konstrukce s bubínkovým rotorem se skládá ze statoru a bubínkového rotoru, který je upevněn na hřídel měřeného pohonu. Vinutí tachogenerátoru je dvoufázové a vzájemně pootočené o 90° elektrických, kde jedna z fází je budící a druhá snímací.

Budící vinutí je napájeno střídavým napětím, které vyvolá magnetický tok. Jestliže se rotor otáčí, vznikne tak indukované napětí na snímací cívce, které je úměrné otáčkám rotoru.[10]

3 Návrh obvodového zapojení

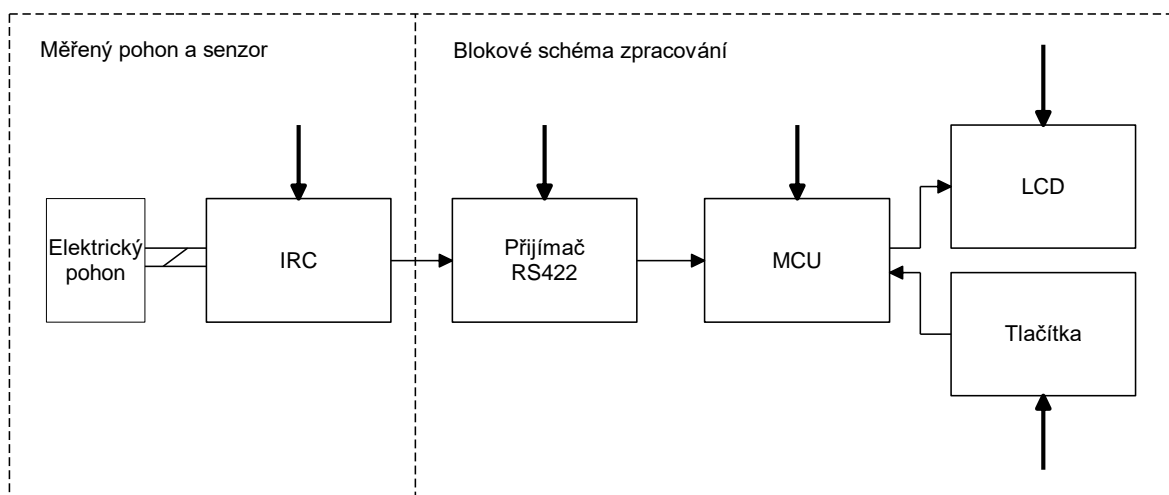
V dnešní době mají návrháři spoustu nástrojů na sestavení a návrhu plošného spoje. Existuje nespočet EDA softwarů, které jsou jak amatérské a vyskytují se např. v internetových prohlížečích, kde se ale nenachází tolik možností pro návrháře, nebo profesionální. U profesionálních softwarů mají návrháři neomezené možnosti (velikost desky, pracovat v týmech, nebo jejich 3D zobrazení). Nevýhody těchto programů je většinou jejich cena, která se vyskytuje v řádech několika tisíců až desetitisíců. Pro návrh zapojení je zvolen software od firmy CadSoft a to EAGLE v nejnovější verzi 9.5.1. V trial verzi je tento software zdarma pro maximální rozměry DPS 10x10 cm a pro nekomerční účely.

Měřicí deska je složena z několika funkčních bloků. Hlavním jádrem celého blokového schématu je mikrokontrolér. Mikrokontrolér je od firmy Microchip a to konkrétně model dsPIC304011¹⁶. Do MCU vstupuje digitální signál od přijímače RS422. Tento přijímač slouží k zakončení sběrnice od IRC a převedení signálu, který produkuje IRC, na signál vhodný pro zpracování v mikrokontroléru. Z mikrokontroléru vede signál do LCD, kde se zobrazují hodnoty otáček za minutu a úhlu natočení proti referenční hodnotě hřídele a uživatelské menu. Celý tento obvod je napájen z Li-Ion baterie, která produkuje napětí 3,7 V. Protože v obvodu je pouze jedna baterie, ale celé zařízení pracuje na úrovni 5 V je potřeba zvýšit napájecí napětí. Tento úkol má na starosti DC/DC měnič a to v zapojení jako STEP UP. O správný chod baterie se stará už hotový BMS modul. Tento modul odpojí baterii, jestliže nastanou stavy, které by mohli vést ke zničení baterie. K nabíjení baterie je použit obvod od firmy Microchipu, který je určen na nabíjení jedné nebo dvou Li-Ion baterií. Přepínač slouží pouze k odpojení obvodu od baterie a je tvořen P-kanálovým MOSFETEM.



Obr. 13: Blokové schéma napájení

¹⁶ Řada dsPIC30F je řada s 30 MIPS CPU, který je vhodný pro řízení pohonu a pro aplikace s využitím širokého provozního napětí.



Obr. 14: Blokové schéma zpracování signálu

3.1 Zdroj napětí

Jako zdroj napětí je použita baterie Li-Ion NCR18650PF. Tuto baterie jsem zvolil z důvodu vysoké kapacity, která dosahuje 2900 mAh a provozního napětí 3,6 V.[14]

Tento druh baterie, je na rozdíl od olovněných akumulátorů tvořen z bezvodového elektrolytu. Pro kladnou elektrodu je využit např. lithium-kobalt oxid (LiCoO_2), nebo jiné lithiové směsi. Elektrolyt je poté tvořen sloučeninou lithium hexafluorofosfát (LiPF_6), záporná elektroda je tvořena pomocí uhlíkového materiálu.¹⁷[15]

Výhody:

- V baterii neprobíhá chemická reakce a je tak dosaženo vysoké životnosti
- Vyšší jmenovité napětí, které dosahuje 3,6 až 3,7 V
- Jejich energetická hustota je vyšší než u ostatních typů článků
- Zlepšení nabíjení, kde nabíjecí křivka je téměř plochá a nabíjecí napětí tak konstantní

Nevýhody:

- Nabíjecí napětí je konstantní, špatné určení stavu nabití z napětí akumulátoru
- Lithium a jeho sloučeniny se stykem s vlhkostí a vzduchem reagují a poškozují se
- Při zahřátí akumulátoru z důvodu zkratu může dojít k vzplanutí baterie
- Výkon klesá se snižující se teplotou

¹⁷ Li-Ion baterie vyžadují větší důslednost při jejich využívání. Dodržování předepsaných nominálních a provozních hodnot. Správné křivky a proudy dobíjení.

3.2 Battery Management System

Battery Management System (BMS) je elektronický systém, který řídí a monitoruje stav baterie pro její správný chod. Vyspělé BMS systémy dnes mohou kontrolovat a vyhodnocovat velké množství údajů o baterii. Nejdůležitějším údajem je napětí a teplota. Tyto údaje potřebujeme znát kvůli tomu, aby nedošlo k nevratnému zničení baterie nebo k takovému poškození, které by vedlo i na fyzickou destrukci baterie a poté i na možný požár.

Námi vybraný BMS modul kontroluje napětí a odebíraný proud z baterie. Jeho hlavním úkolem je odpojit baterii, jestliže dojde k přepětí u Li-Ion baterie 4 V. Takové přepětí by mohlo být způsobeno nabíjecím obvodem. BMS modul také odpojí baterii, jestliže napětí dosáhne podpětí 2,9 V. Tato hodnota napětí je hraniční, kdybychom šli ještě níže pod tuto hranici, baterie by už nebyla provozuschopným stavu a byla by už trvale poškozena. Modul odpojí také baterii, jestliže odebíraný proud z baterie vzroste na hodnotu 4,5 A.

Modul se skládá z řídicího obvodu DW01-P, duálního N-kanálového MOSFETu. Baterie se zapojuje na pozice B+ a B-. Výstup je označen jako P+ a P-.[16]

3.3 Nabíječka

Další částí blokového schématu je nabíječka Li-Ion baterie. K nabíjení baterie je použit obvod MCP73831/2. Tento obvod od firmy Microchip slouží k nabíjení jednočládkových Li-Ion baterií. Obvod je vhodný při použití vstupního napětí 5 V, proto jako zdroj energie je zvoleno 5 V micro-USB.

Obvod nabíjí baterii konstantním napětím $U_{NAB} = 4,2 \text{ V}^{18}$ a proudem, který je nastaven pomocí rezistoru R_{21} . Velikost rezistoru je zvolen 2200 Ω což podle vztahu viz. 5, odpovídá nabíjecímu proudu $I_{NAB} = 450 \text{ mA}$.

$$I_{NAB} = \frac{1000}{R_{21}} \quad 5$$

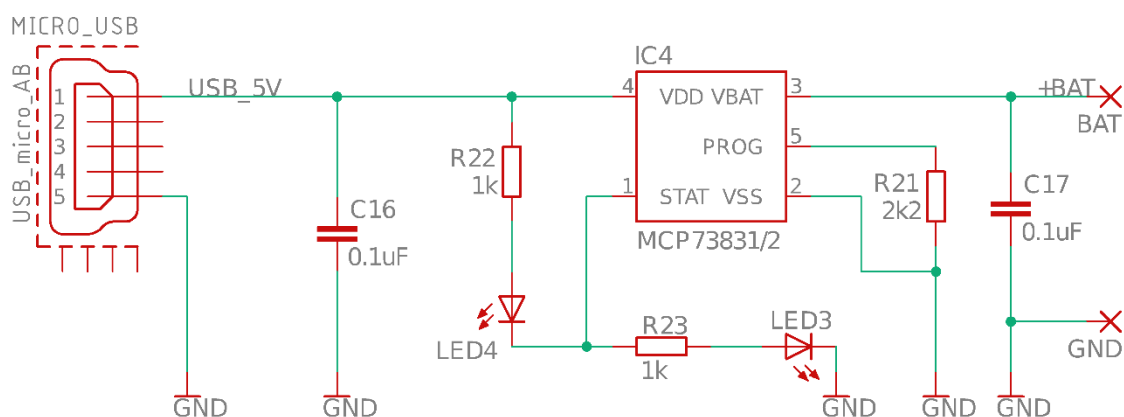
Kde:

I_{NAB} nabíjecí proud

R_{21} rezistor na nastavení nabíjecího proud (R_{PROG})

¹⁸ Napětí je určeno použitým typem obvodu. Poslední číslo v kódovém označení tudíž 2 udává, že V_{NAB} může být v rozsahu od 4,168V do 4,232V

K signalizaci stavu baterie slouží diody LED4 a LED3. LED4 je připojena mezi napájecí napětí a výstup STAT¹⁹, LED3 je zapojená mezi STAT a GND. Jestliže LED4 svítí a LED3 nesvítí signalizuje to nabíjená baterie. Jestliže svítí LED3 a LED4 ne, signalizuje to nabitou baterii. Jestliže baterie není připojená do obvodu, obě LED jsou rozsvícené. Schéma zapojení viz. *Obr. 15*. Návrh zapojení jsem převzal z katalogového listu výrobce [17].



Obr. 15: Schéma zapojení nabíjecího obvodu pro Li-Ion

3.4 DC/DC měnič

Jelikož zařízení pracuje na napěťové hladině 5 V, ale jako zdroj napětí je zvolen akumulátor s nominální hodnotou 3,6 V, bylo potřeba toto napětí zvýšit. Tento úkol obstarává DC/DC Step-up měnič LM2523 od firmy Texas Instruments.

Obvod LM2623 je vysoce efektivní a univerzální DC/DC měnič, kde jeho účinnost dosahuje až 90 %²⁰. Jeho vstupní napětí může být v rozsahu 0,8 V do 14 V a výstupní napětí od 1,24 V až 14 V. Jeho maximální zatěžovací proud je 600 mA. Maximální spínací frekvence poté dosahuje 2 MHz.

Jak můžeme vidět zapojení obsahuje spínaný měnič LM2623 a několik externích součástek. Nejdůležitější z nich je pak indukčnost L_1 , dioda D_1 , a kondenzátor C_3 , které zajišťují správnou funkci DC/DC měniče. Kondenzátor C_2 a rezistor R_1 jsou zde proto, aby bylo možné nastavit správnou frekvenci interního oscilátoru²¹. Hodnota C_2 a R_1 se nedá spočítat, závisí totiž na vstupním a výstupním napětí. Správnou hodnotu můžeme docílit pouze metodou pokus, omyl, kde budeme sledovat špičkové proudy, které se tvoří na induktoru. Správnou velikost výstupního napětí poté zajišťují rezistory R_2 a R_3 . Pomocí jejich poměrů lze zajistit, aby výstupní napětí bylo 5 V. Správný poměr rezistorů se poté určuje z rovnice 6. Návrh zapojení jsem převzal z katalogového listu výrobce.[18]

¹⁹ STAT neboli status indicator je výstup stavu nabíjení. Výstup má 3 stavy a to log 1, kdy je přivedeno na výstup napájecí napětí, log 0 kdy je výstup uzemněn nebo stav vysoké impedance.

²⁰ Při vstupním napětí 3,7V a výstupním 5V a 600mA dokáže DC/DC měnič pracovat z účinností 85%

²¹ Spínací frekvence se doporučuje mezi 300 kHz až 2 MHz

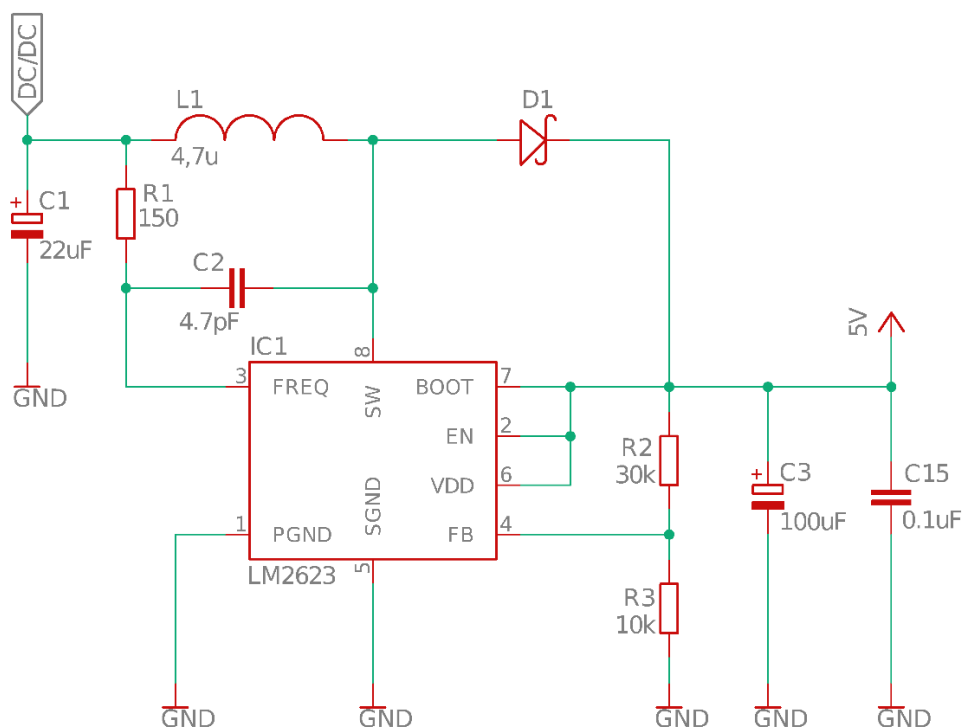
$$R_2 = R_3 \cdot \left[\left(\frac{V_{out}}{1,24} \right) - 1 \right]$$

6

Kde:

R_2, R_3 jsou rezistory, které určují poměr zpětné vazby

V_{OUT} je výstupní napětí z DC/DC měniče



Obr. 16: Schéma zapojení DC-DC měniče

3.5 Přijímač RS422 a externí součásti sběrnice

Přijímač RS422 slouží k převedení diferenčního signálu od IRC senzoru na signál, vhodný ke zpracování v mikrokontroléru. Jako přijímač jsem tak zvolil obvod SN65LBC173A. Tento obvod obsahuje čtyři diferenční linkové přijímače. Tyto přijímače dosahují rychlosti až 50 Mbps²², jejich vstupní diferenční napětí může být od -7 V do 12 V. V přijímači je také implementována ESD²³ ochrana do 6kV.

Princip RS422 přijímače spočívá v převedení diferenčního signálu, kde logickou hodnotu obstarává rozdíl potenciálu mezi vodiči, na signál, kde logickou hodnotu bude udávat rozdíl mezi potenciálem a zemním potenciálem. Tento převod můžeme udělat pomocí Schmittova²⁴ klopného obvodu. Přijímač obsahuje čtyři takové obvody, každý na

²² Mbps je veličina, která vyobrazuje přenosovou rychlost (milion bitů za sekundu)

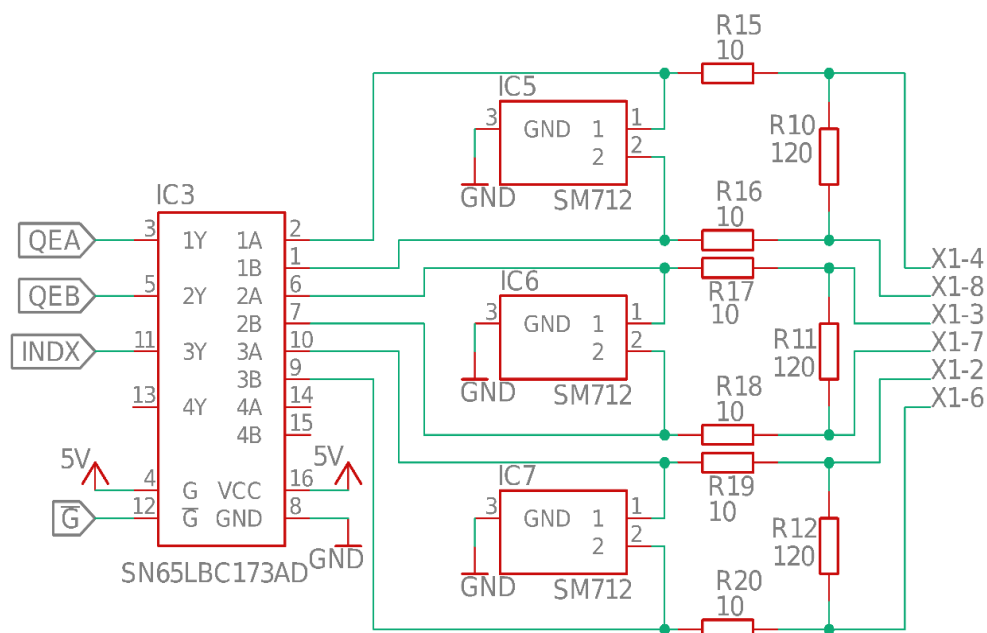
²³ ESD (elektrostatický výboj) je náhlý a krátkodobý elektrostatický výboj. Nebezpečný je hlavně u elektronických součástek, které jsou vyrobeny pomocí unipolární technologie.

²⁴ Schmittův klopný obvod je komparátor s hysterezní smyčkou

jeden vstupní signál. K přepínání výstupního signálu od přijímače slouží vstupy G a \bar{G} . Vhodnou kombinací těchto vstupů docílíme pozitivní a negativní logiky výstupu. Jestli jsou vstupy G a \bar{G} neaktivní, vstupy do přijímače poté představují pro sběrnici vysokou impedanci. [19]

Pro zvětšení ochrany ESD byly navíc použity obvody SM712. Tyto obvody obsahují TVS²⁵ diody, které dokážou pracovat na sběrnici o provozním napětí od -7 V do 12 V. ESD ochrana pak dokáže ochránit zařízení, až do elektrostatického výboje +30kV, nebo krátkodobé špičky $t_p = 8/20 \mu s$, kde proud by mohl dosahovat hodnot $I_{pp} = 19 A$. Rezistory R_{15} až R_{20} snižují maximální proud do přijímače, aby mohli tak být použity menší TVS diody.[20]

Rezistory R_{10} , R_{11} , R_{12} jsou zde pro zakončení sběrnice. U RS422 se běžně používají zakončovací impedance²⁶ 120 Ω . Jestliže by nebyla sběrnice zakončená, vznikali by na jejím výstupu odrazy, které by negativně ovlivnili rychlost přenosu a kvalitu dat. Schéma zapojení viz. Obr. 17.



Obr. 17: Schéma zapojení přijímače RS422 s TVS diody a terminátory

²⁵ TVS jsou speciální diody – transily. Tyto diody mají vyšší jmenovitý výkon, provozní napětí, průrazné napětí či maximální průrazné napětí.

²⁶ V některé literatuře se zakončovací impedance nazývají terminátory

3.6 Mikrokontrolér

Jelikož je v aplikaci použit IRC senzor, bylo by vhodné použít MCU, který obsahuje HW modul na zpracování signálu od IRC²⁷. Řídícím prvkem se stal nakonec 16-bitový MCU řady dsPIC30 a to dsPIC30F4011 od firmy Microchip. V *Tabulka 3* jsou zobrazeny základní údaje o mikrokontroléru.[21]

Tabulka 3: Vlastnosti mikrokontroléru

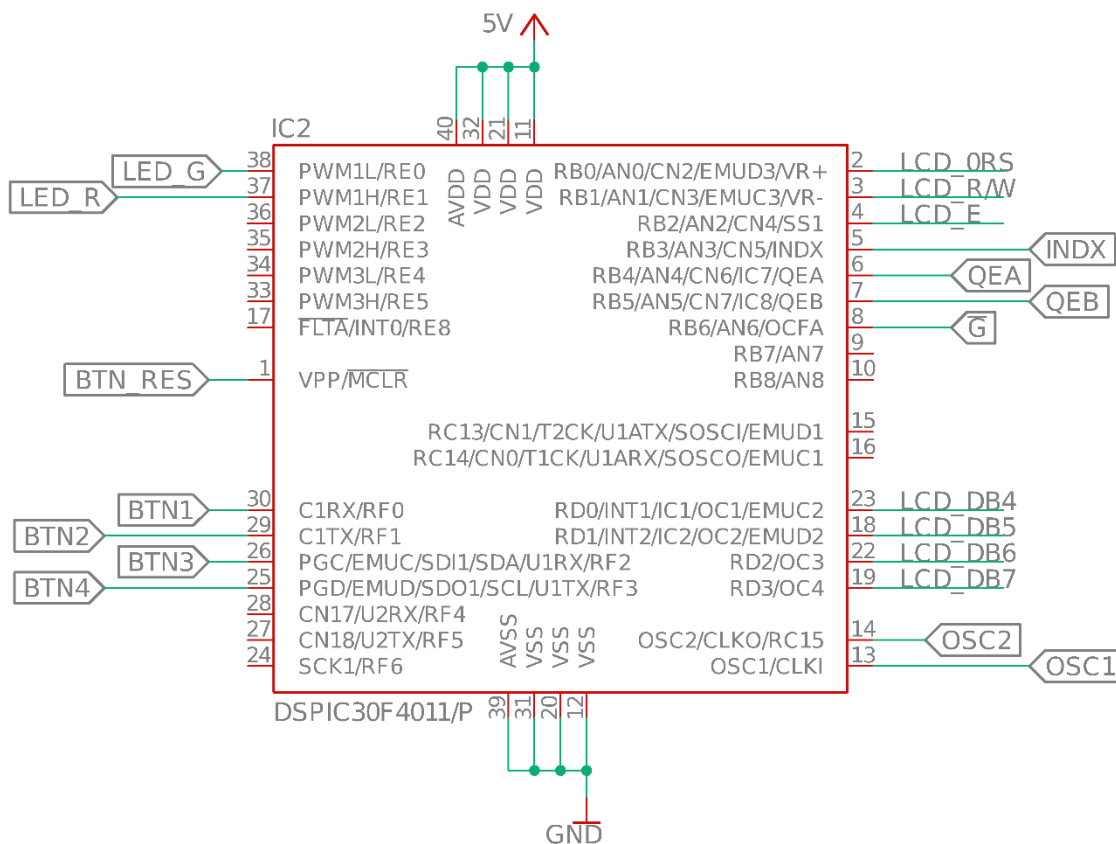
Výrobce	Microchip
Typ	dsPIC30F4011
Architektura	Harvard 16-bit
Napájecí napětí	2,5 - 5,5 V
Max. kmitočet	120 MHz
Rychlost jádra	30 MIPS
Paměť	Flash 48 KB SRAM 2 KB
Počet pinů	40
Periférie	2 x UART 1 x SPI 1 x I2C 5 x 16-bit a 2 x 32-bit čítač 10 x PWM 1 x QEI

K mikrokontroléru je připojen externí krystal Y_1 o frekvenci 10 MHz a dvěma kondenzátory, který zaručují stabilitu výstupní frekvence krystalu. Krystal je připojen na piny 13 a 14, které slouží k přivedení externích hodin. Pro vyhlazení napájecího napětí pro MCU, jsou na vstupy V_{DD} a AV_{DD} přidány keramické kondenzátory C_4 , C_5 , C_6 , a C_{18} o velikosti 0,1 μ F. Dále se zde nacházejí tlačítka, které jsou připojeny přes pull-up rezistory s protizákmitovými kondenzátory na piny 25, 26, 29, 30. Tyto tlačítka společně s LED1 a LED2 zapojených na pinech 37 a 38 slouží k ovládání zařízení a ke zpětné odezvě. Jako uživatelské rozhraní slouží LCD displej[22]. Displej je připojen na piny 2, 3, 4, 18, 19, 22 a 23. K regulaci jasu displeje se zde nachází odporový trimr R_5 . K restartu MCU je zde tlačítko, které je přivedeno na pin 1.

K přijímání signálu od přijímače RS422 jsou určeny piny 5, 6, 7. Tyto piny jsou označeny jako QEA, QEB a INDX. Na vstupech těchto pinů se nachází digitální filtry, které slouží k odfiltrování nízkoúrovňového šumu a naindukovaného rušivého signálu, který se často vyskytuje na elektrických pohonech. Signál je po filtrech přiveden do dekódovacího

²⁷ Vhodný modul pro zpracování signálu z IRC u firmy Microchip se jmenuje Quadrature Encodare Interface (QEI)

modulu, kde je signál zpracováván a poslán do 16-bitového čítače, čítající jak nahoru, tak i dolů. Na pinu 8 je řídicí signál \bar{G} který řídí linkový budič. Schéma zapojení MCU viz. Obr. 18.



Obr. 18: Schéma zapojení MCU

4 Program pro mikrokontrolér

Popisovaný firmware je dostupný na přiloženém CD v adresáři „Firmware“.

Software je napsán v jazyce C za pomoci vývojového studia MPLAB X²⁸, které je dostupné zdarma na stránkách výrobce Microchip Technology. Od stejného výrobce je také použit programátor PicKit 3. Tento programátor je vhodný jak k nahrání programu do MCU, ale také k jeho ladění.

4.1 Direktivy překladače

Na začátku programu jsou vloženy knihovny, které jsou potřeba k funkčnosti kódu. Jedná se o knihovny na práci s řetězci, knihovna MCU, knihovny na makra a další. Dále následuje konfigurace oscilátoru a fázového závěsu, zapnutí resetovacího tlačítka MCLR a vypnutí WatchDog.

```
#include <xc.h>
#include "system.h"
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <stdio.h>
#include <libpic30.h>
#include <p30f4011.h>

// konfigurace oscilatoru 80MHz, FCY = 80/4
#pragma config FPR = XT_PLL8
#pragma config FOS = PRI
#pragma config FCKSMEN = CSW_FSCM_OFF

// vypnuti wachdog
#pragma config WDT = WDT_OFF

// konfigurace resetu
#pragma config FPWRT = PWRT_OFF
#pragma config BOREN = PBOR_OFF
#pragma config MCLRE = MCLR_EN
```

4.2 Quadrature Encoder Interface (QEI)

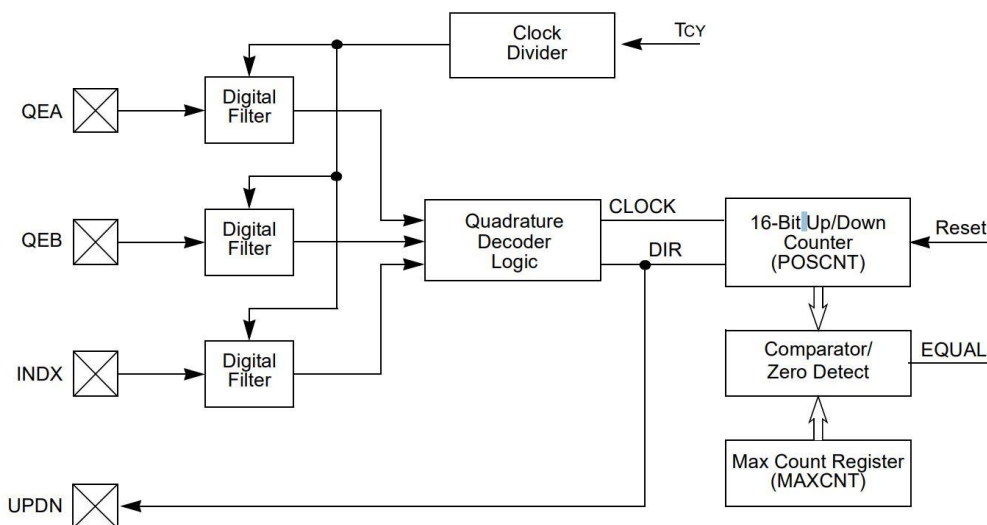
Níže popsané se nachází v Reference Manual od dsPIC30F**** [23]

Modul QEI poskytuje rozhraní pro IRC kodéry. Modul se skládá z několika částí:

- 3 vstupních pinů a jednoho výstupního
- Z programovatelného vstupního digitálního filtru
- Kvadrurního dekodéru
- 16-bitového čítače čítajícího nahoru a dolů

²⁸ Vývojové studio je založeno na open-source platformě NetBeans.

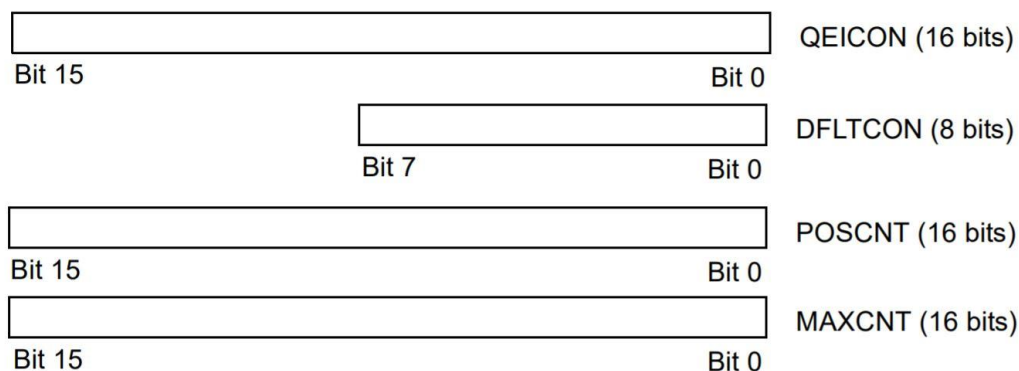
- Komparátoru
- Registru na maximální hodnotu čítače
- Děliče taktovacích hodin



Obr. 19: Blokové schéma QEI modulu [23]

Modul má také 4 uživatelsky přístupné registry:

- Control/Status Register (QEICON) – Registr na obsluhu QEI modulu. Nastavení stavových příznaků
- Digital Filter Control Register (DFLTCON) – Registr na nastavení příznaků digitálního filtru
- Position Count Register (POSCNT) – Registr umožňující čtení 16-bitového čítače polohy
- Maximum Count Register (MAXCNT) – Registr obsahující hodnotu, která bude porovnávána s čítačem POSCNT



Obr. 20: 4 uživatelsky přístupné registry QEI modulu [23]

4.2.1 Přerušení pro QEI

Výpočet rychlosti a úhlové rychlosti se provádí v periodickém přerušení. Interval přerušení musí být kratší než minimální doba potřebná pro ½ otáčky při maximální rychlosti viz. 7.

$$INTERRUPT_PERIOD = \frac{60}{2 \cdot max_RPM} \quad 7$$

Kde:

INTERRUPT_PERIOD	časová perioda přerušení
max_RPM	maximální otáčky rotoru

```
void InitTMR1(void) {
    // PR1 = INTERRUPT_PERIOD/(Tcy * 64)

    TMR1 = 0;
    T1CONbits.TON = 0;
    T1CONbits.TSIDL = 0;
    T1CONbits.TGATE = 0;
    T1CONbits.TCS = 0;
    T1CONbits.TCKPS = 2;
    PR1 = 2343;
    IFS0bits.T1IF = 0;
    IEC0bits.T1IE = 1;
    T1CONbits.TON = 1;
    return;
}
```

4.2.2 Výpočet filtru, inicializace QEI a digitálního filtru

Na výpočet filtru je potřeba znát minimální šířku pulsu přicházející od IRC. Tato šířka je určena maximálními otáčkami rotoru a je dána vztahem viz. 8. Z tohoto údaje vypočteme předděličku digitálního filtru viz. 9.

$$sirka_pulsu = \frac{30}{max_RPM \cdot ENCODARE_PULSES} \quad 8$$

Kde:

sirka_pulsu	minimální šířka pulsu
max_RPM	maximální otáčky rotoru
ENCODARE_PULSES	maximální počet pulsů na otáčku

$$pred_de = \frac{MIPS \cdot sirka_pulsu}{3} \quad 9$$

Kde:

pred_de	předdělička
MIPS	frekvence instrukcí
sirka_pulsu	minimální šířka pulsu

```
void InitQEI(void) {  
  
    // inicializace QEI  
    QEICONbits.QEIM = 0;  
    QEICONbits.CNTERR = 1;  
    QEICONbits.QEISIDL = 0;  
    QEICONbits.SWPAB = 0;  
    QEICONbits.PCDOOUT = 0;  
    QEICONbits.POSRES = 0;  
    QEICONbits.TQCS = 0;  
    QEICONbits.TQGATE = 0;  
    QEICONbits.TQCKPS = 0;  
  
    // inicializace digitalnio filtru  
    DFLTCONbits.IMV1;  
    DFLTCONbits.CEID = 1;  
    DFLTCONbits.QEOUT = 1;  
    DFLTCONbits.QECK = 4; // 1:32  
  
    POSCNT = 0;  
    QEICONbits.QEIM = 7; //X4, MAXCNT  
  
    return;  
}
```

4.2.3 Výpočet úhlu a otáček

Pro výpočet úhlu natočení a otáček, musíme znát aktuální hodnotu pulsů, které přišli od IRC. Tato hodnota se inkrementuje nebo dekrementuje (podle směru) do registru POSCNT²⁹. Každý IRC senzor má své rozlišení, který je dáno konstrukcí daného senzoru. Pro zvýšení přesnosti můžeme použít vyhodnocování signálu (X2 nebo X4)³⁰.

Úhel vypočteme pomocí aktuálního stavu registru POSCNT, který vydělíme vhodnou konstantou, abychom získali úhel natočení ve stupních. Pro výpočet rychlosti musíme znát starý stav registru a nový stav registru POSCNT. Rozdíl těchto registrů nám dává informaci, o kolik se zvýšil stav registru POSCNT za jeden interval přerušení. Tuto informaci použijeme pro výpočet úhlové rychlosti.

²⁹ Registr POSCNT se vždy resetuje, jestliže načítá do hodnoty, která je zapsána v registru MAXCNT

³⁰ Mód X2 znamená že reagujeme pouze na logické úrovně (přesnost zvýšíme 2x), u X4 reagujeme jak na logické úrovně, tak i na vzestupné a sestupné hrany (přesnost zvýšíme 4x),

```
void __attribute__((__interrupt__, __auto_psv__)) _T1Interrupt(void) {  
    IFS0bits.T1IF = 0;  
  
    MAXCNT = rozliseni_x4; //nastaveni velikosti registru MAXCNT kdy pri  
porovnani se bude registre POSCNT resetovat  
    POSCNTcopy = (int) POSCNT;  
  
    Angle_POSCNT[1] = Angle_POSCNT[0];  
    Angle_POSCNT[0] = POSCNTcopy; // hodnota registru POSCNT musise prepocitat  
na uhel  
    if (rozliseni_x4 == 2048)  
        uhel = (Angle_POSCNT[0] / 5.688);  
    if (rozliseni_x4 == 4096)  
        uhel = (Angle_POSCNT[0] / 11.377);  
    if (rozliseni_x4 == 8192)  
        uhel = (Angle_POSCNT[0] / 22.755);  
    if (rozliseni_x4 == 16384)  
        uhel = (Angle_POSCNT[0] / 45.511);  
    if (rozliseni_x4 == 32768)  
        uhel = (Angle_POSCNT[0] / 91.022);  
  
    pocet_pulzu_per = Angle_POSCNT[0] - Angle_POSCNT[1]; // vypocet kolik  
prislo pulzu za periodu  
  
    if (pocet_pulzu_per >= 0) {  
        if (pocet_pulzu_per > ((rozliseni_x4 / 2) - 1)) {  
            pocet_pulzu_op = pocet_pulzu_per - rozliseni_x4;  
        } else {  
            pocet_pulzu_op = pocet_pulzu_per;  
        }  
    } else {  
        if (pocet_pulzu_per < (-(rozliseni_x4 / 2))) {  
            pocet_pulzu_op = pocet_pulzu_per + rozliseni_x4;  
        } else {  
            pocet_pulzu_op = pocet_pulzu_per;  
        }  
    }  
  
    uhlova_rychlost = ((2.0 * 3.14159 * (float) pocet_pulzu_op) / (0.0075 *  
(float) rozliseni_x4)); // vypocet uhlove rychlosti (2*PI*n)/(N*T)  
  
    if (uhlova_rychlost < 0)  
        uhlova_rychlost = -uhlova_rychlost;  
  
    otacky_min = uhlova_rychlost * 9.549; // prepocet na otacky za minutu  
    return;  
}
```

4.3 LCD

Ke komunikaci s displejem máme k dispozici 4-bitovou datovou sběrnici. Po této sběrnici se komunikuje tak, že nejdříve pošleme horní 4 bity a zapíšeme signálem ENABLE, potom nižší 4 bity a zapíšeme signálem ENABLE.

LCD displej obsahuje řadič HD447780U který musíme nejdřív inicializovat. Postup inicializace je popsán [24].

5 Výroba DPS a konstrukce krabičky

5.1 Výroba DPS

Návrh DPS proběhl v programu Eagle. Velikost součástek byli voleny tak, aby bylo možné je ručně osázet. Jako pasivní součástky byly zvoleny SMD velikosti 0805. MCU byl zvolen v pouzdře DIP40. Takové pouzdrů bylo zvoleno kvůli jednoduchosti MCU vyměnit, pokud by se zničil. K uchycení DPS do krabičky slouží 4 díry o $\varnothing 3$ mm v rozích desky.

Po návrhu DPS byli vygenerovány výstupní soubory, a to Gerber a Excellon data. Ty jsou také dostupné na přibaleném CD ve složce „soubory DPS“. Tyto soubory byli odeslány do firmy PragoBoard s.r.o. kde byla vytvořena DPS. Rozměry DPS jsou 82,5 x 80 mm.

5.2 Výroba krabičky

Návrh krabičky byl realizován ve programu progeCAD. Tento program je vhodný na 2D výkresy, ale také na jednoduché 3D věci. Tento program umí ukládat 3D soubory do formátu .stl, který je vhodný pro 3D tiskárny. Krabička je tak vytištěna na 3D tiskárně pomocí materiálu PLA.

Krabička je složena ze 2 částí, dolního a horního panelu. Horní panel obsahuje 4 díry o průměru $\varnothing 7$ mm, kde budou umístěny tlačítka. Dále obsahuje 2 díry o průměru $\varnothing 3$ mm kde budou indikační LED diody, indikující stav nabíjení baterie. Uprostřed je pak obdélníková díra o rozměrech 44 x 26 mm sloužící k umístění displeje. Pro umístění DPS zde najdeme 4 díry o průměru $\varnothing 2,5$ mm kam je potřeba ručně udělat závity. Ke spojení obou částí krabičky jsou v horním panelu vytvořeny v rozích sloupky a kde naproti nim jsou v dolním panelu díry pro uchycení pomocí šroubků.

Jestliže dolní a horní panel spojíme, vznikne nám na pravé části otvor na konektoru D-SUB9 který slouží k připojení IRC senzoru k zařízení. V horní části vznikne otvor na připojení USB-A konektoru k nabíjení baterie. Na levé části pak vznikne otvor na tlačítko vyp-zap. Celková velikost krabičky je 97 x 94 x 62 mm. Data o krabičce jsou dostupné v přibaleném CD ve složce „krabička“.

6 Testování

6.1 Použitý IRC senzor

Hlavním úkolem celého zařízení, je přijímat a vyhodnocovat data přicházející od inkrementálního senzoru. Senzor je použit od firmy HOHNER AUTOMATICOS a to z produktové řady SERIE 66, která je ekvivalentem senzorů od firmy SIEMENS a to produktové řady 1XP8001-1/ 1XP8001-2. Produktová řada SERIE 66 se dělí dále do typů s referenčními kódy 0, 1, 2, 6. Celá tato řada je určena pro průmyslové aplikace a pro uchycení pomocí závitu do hřídele pohonu. SERIE 66 se také vyznačuje vysokým počtem pulzů na otáčku a to až 10 000, maximálními otáčky 6000, ochranou IP64 a anti-rotáčním systémem.

Náš typ je s referenčním kódem 2, tudíž výstupní obvod je tvořen vysílačem RS422 a maximálním počtem pulzů na otáčku 1024. Důležité parametry tohoto typu jsou napájecí napětí, které je 5 V, dále spotřeba, která se pohybuje okolo 70 mA, délka signálového kabelu, který je až 1200 m a jeho logické úrovně, kde log „0“ < 0,5 VDC a log „1“ > 2,5 VDC. Jeho výstupy jsou TTL kompatibilní.[25]

6.2 Průběh testování

Hodnoty otáček se zobrazují na první stránce LCD displeje. Na druhé stránce se zobrazuje úhel natočení, v pravém dolním rohu se zobrazuje směr otáčení. Na 3 stránce můžeme nastavit rozlišení IRC senzoru. Je zde na výběr několik přednastavených hodnot: 512, 1024, 2048, 4096, 8192. Stránky se přepínají pomocí šipek buďto svisle nebo vodorovně.

Testování probíhalo na elektrickém pohonu viz *Tabulka 4*, s použitým IRC senzorem v kapitole výš. Testování bylo zrealizováno na elektrickém pohonu, kde byli otáčky voleny od minimálních 20 do maximálních 1500 ot/min. Zařízení v tomto spektru otáček pracovala spolehlivě a přesně. Odběr z baterie byl změřen na 300 mA. Odběr zahrnoval senzor + vlastní spotřeba. Pokud zařízení bude obsahovat kvalitní Li-ion baterii, můžeme počítat s 10 hod provozuschopností.

Tabulka 4: Testovaný pohon

Název	Siemens
Typ	1LA7163-4AA60-Z
f [Hz]	50
P [kW]	11
U [V]	400/690 Δ/Y
cosφ	0,84

7 Závěr

V rešeršní části jsou popsány senzory pro měření otáček a úhlu natočení. Nacházejí se zde jak senzory optoelektronické, které jsou dnes hojně využívány v celé řadě odvětvích, tak senzory elektrodynamické a indukční, se kterými se už moc nesetkáme. V kapitole u IRC senzoru najdeme část zabývající se různými výstupními signály z IRC senzoru, tak jejich převod na otáčky a úhel natočení. Tyto metody jsou pak využity v praktické části při návrhu hardwarového a softwarového řešení.

Praktická část bakalářské práce, je zaměřena na návrh DPS, výběr a realizace hardwaru, softwaru pro otáčkoměr. Hlavními požadavky bylo vytvořit zařízení, které bude přenosné, snadno ovladatelné a napájené z baterie.

Jako baterie tak byla zvolena 1 článková Li-ion baterie, a pomocí STEP-UP měniče bylo její napětí zvýšeno na 5 V. Jako MCU byl zvolen dsPIC30F4011 od firmy Microchip. Tento MCU je vhodný pro použití v motorových a měřicích aplikacích, kde se využívá IRC senzor. Pro převod diferenčního signálu je použit přijímač RS422. Otáčky a úhel natočení se zobrazuje na LCD displeji, kde se dá posouvat pomocí tlačítek.

Pro výpočet otáček je použita metoda, kde se využívá nasčítaných pulsů za pevně danou periodu přerušení. Přerušení je stanoveno na 7,5 ms. Tato doba je dostatečná na to, aby bylo možné změřit minimálně 2 vzorky za otáčku při maximální otáčkách 4000 ot/min. Úhel se dopočítává z nasčítaných impulsů.

Zařízení bylo otestováno na elektrickém pohonu s asynchronním motorem SIEMENS 1LA7163-4AA60-Z, kde správně ukazovalo otáčky, úhel a směr.



Obr. 21: Výsledné měřicí zařízení

Seznam literatury a informačních zdrojů

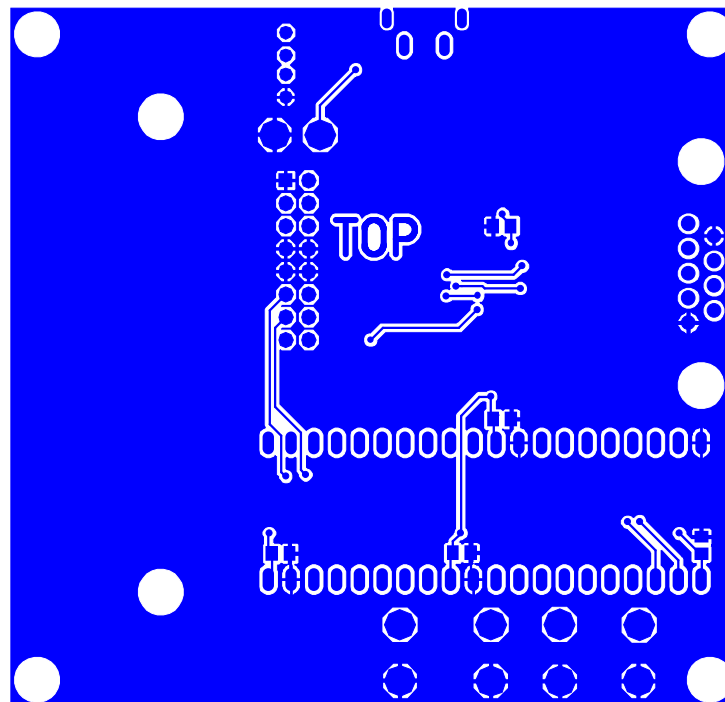
- [1] MARTÍNEK, Radislav. *SENZORY v průmyslové praxi*. Praha: Technická literatura BEN, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [2] MICHNA, Vladimír. *Snímače polohy, dráhy a jejich derivací - 1* [online]. 2012 [vid. 2020-03-28]. Dostupné z: http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Snimace_polohy_a_drahy_1.pdf
- [3] BENEŠ, Pavel. JANEČEK, Josef. KRÁL, Jindřich. KÜNZEL, Gunnar. LASKO, Branislav. SEMERÁD, Jaroslav. SOUČEK, Pavek. ŠMEJKAL, Ladislav. VORÁČEK, Rudolf. MAIXNER, Ladislav. ŠULC, Bohumil. *Automatizace a automatizační technika 1 Systémové pojetí automatizace*. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-3628-7.
- [4] PETRELLA, Roberto. TURSINI, Marco. PERETTI, Luca. ZIGLIOTTO, Mauro. *Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis* [online]. nedatováno [vid. 2020-04-23]. Dostupné z: http://www.diegm.uniud.it/petrella/Azionamenti Elettrici II/Tesine/Petrella et al. - Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives_a Comparative Analysis.pdf
- [5] *Introduction to Incremental Encoders* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: <http://www.sensoray.com/support/appnotes/encoders.htm>
- [6] *Encoder Output | Specifying The Right Output Driver | Dynapar* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: https://www.dynapar.com/knowledge/encoder_output/
- [7] *Sběrnice RS-422, RS-423 a RS-485 - Root.cz* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/sbernice-rs-422-rs-423-a-rs-485/>
- [8] *What are Absolute Encoders? Technical Summary* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/absolute-encoders/>
- [9] *When is an Absolute Encoder Right for Your Design? | CUI Devices* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.cuidevices.com/blog/when-is-an-absolute-encoder-right-for-your-design>
- [10] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Praha: SNTL-NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1983.
- [11] FORMÁNEK, Josef. *Výukové texty pro předmět Měřicí technika Podklady k principu měření polohy a vzdálenosti*. nedatováno.
- [12] *Resolver (electrical) - Wikipedia* [online]. [vid. 2020-03-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_(electrical))
- [13] *AMCI: Advanced Micro Controls Inc :: What is a Resolver?* [online]. [vid. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.amci.com/industrial-automation->

- resources/plc-automation-tutorials/what-resolver/
- [14] PANASONIC. *Lithium Ion NCR18650PF* [online]. 2012 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/6bcccf625521ce78e4d25535e0dbd439/NCR18650PF.pdf>
- [15] *Lithiové akumulátory - TZB-info* [online]. [vid. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [16] GM ELECTRONIC, spol. s.r.o. *Ochranný modul pro lithiovou baterii* [online]. [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/ochranny-modul-pro-lithiovou-baterii>
- [17] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Datasheet Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers: Charge Management Controllers* [online]. 2008 [vid. 2020-03-21]. ISBN 978-1-63276-375-4. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21984F.pdf>
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. *Datasheet LM2623 General-Purpose, Gated-Oscillator-Based DC-DC Boost Converter* [online]. 2017 [vid. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2623.pdf>
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *Datasheet SN65LBC173A, SN75LBC173A QUADRUPLE ES-485 DIFFERENTIAL LINE RECEIVERS* [online]. 2005 [vid. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slls456b/slls456b.pdf>
- [20] LITTELFUSE. *Datasheet TVS Diode Arrays (SPA® Diodes) ® Diodes) General Purpose ESD Protection - SM712* [online]. 2019 [vid. 2020-03-22]. Dostupné z: https://m.littelfuse.com/~-/media/electronics/datasheets/tvs_diode_arrays/littelfuse_tvs_diode_array_sm712_datasheet.pdf.pdf
- [21] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Datasheet dsPIC30F4011/4012* [online]. 2010 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70135G.pdf>
- [22] MIDAS DISPLAYS. *Datasheet MC20805A6W-GPR-V2* [online]. 2016 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.midasdisplays.com/getattachment/4e68431f-0227-421c-b01c-734b2d503352/specification>
- [23] *dsPIC30F Family Reference Manual High-Performance Digital Signal Controllers* [online]. 2006 [vid. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70046e.pdf>
- [24] *DOVEDA Procesory PIC - LCD displej* [online]. [vid. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://pic16fxx.sweb.cz/programovani/lcd/>
- [25] *SERIE 66 | Hohner Automáticos* [online]. [vid. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.encoderhohner.com/product/serie-66/>

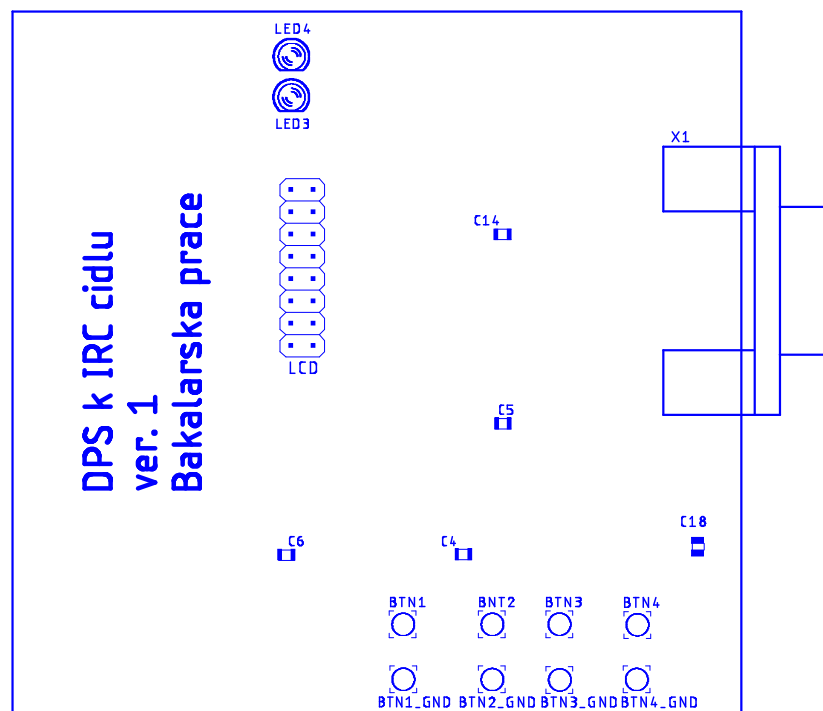
Přílohy

PŘÍLOHA A – DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ STRANA TOP A OSAZOVACÍ VÝKRES	II
PŘÍLOHA B – DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ STRANA BOT A OSAZOVACÍ VÝKRES	III
PŘÍLOHA C – SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ ČÁST	IV
PŘÍLOHA D – SCHÉMA ZAPOJENÍ ZPRACOVÁNÍ	V

Příloha A – Deska plošných spojů strana TOP a osazovací výkres

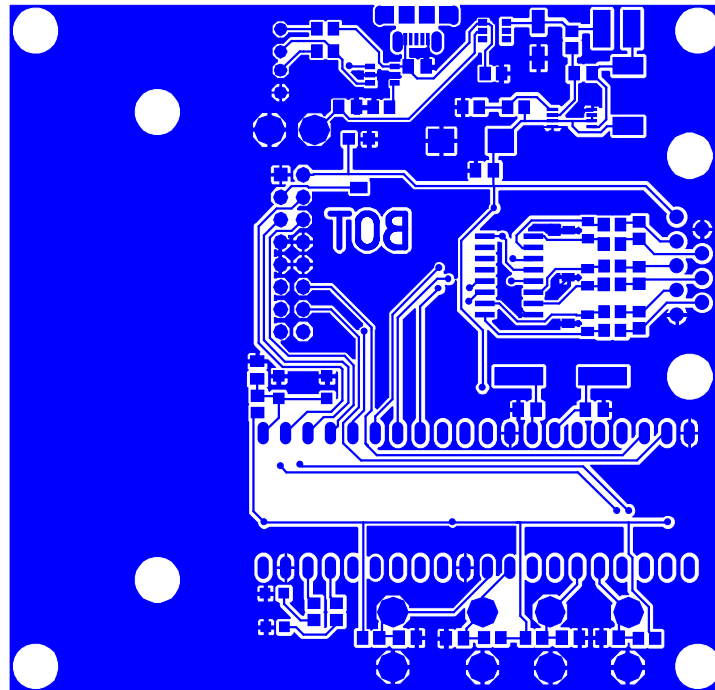


P. Obr. 1: Vrstva s mědí TOP

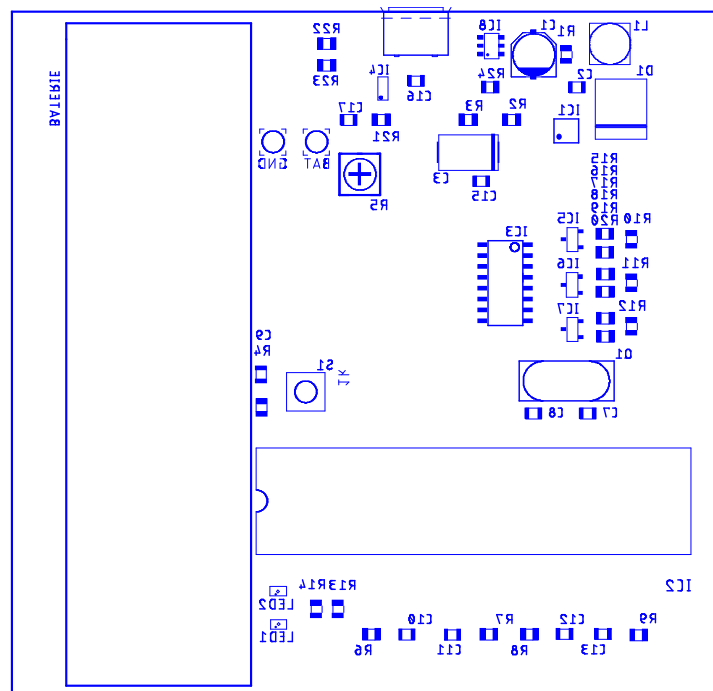


P. Obr. 2: Osazovací výkres TOP

Příloha B – Deska plošných spojů strana BOT a osazovací výkres

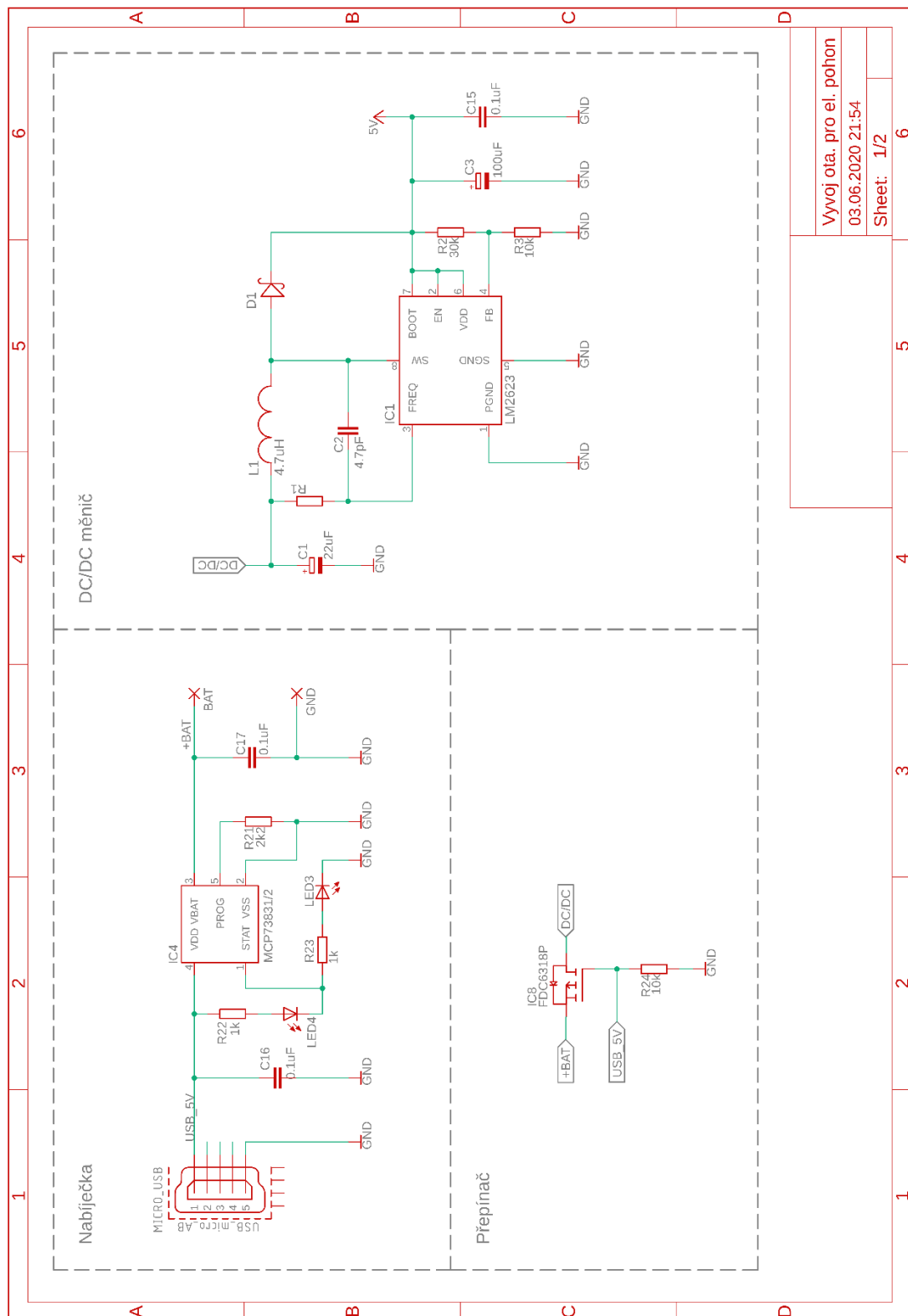


P. Obr. 3: Vrstva s mědí BOT



P. Obr. 4: Osazovací výkres BOT

Příloha C – Schéma zapojení napájecí část



Vývoj ota. pro el. pohon
03.06.2020 21:54
Sheet: 1/2

Příloha D – Schéma zapojení zpracování

