

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Digitální měřicí jednotka**

Dominik Jand'ourek

Bakalářská práce

2023

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Dominik Jandourek**  
Osobní číslo: **I19029**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Téma práce: **Digitální měřicí jednotka**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace elektronické jednotky pro odměřování polohy a úhlů laboratorních přístrojů využívajících kvadratických inkrementálních snímačů. Základem elektronické jednotky bude vybraný typ jednočipového mikropočítače, který může být součástí standardního vývojového kitu. Vstupně výstupní obvody mikropočítače budou umožňovat připojení použitých snímačů a zpracování jejich signálů. Vizualizace naměřených veličin bude zobrazována na zvoleném typu displeje. Konstanty pro výpočet měřených veličin budou uloženy v nevolatilní paměti mikropočítače. Při konstrukci přístroje bude kladen důraz na uživatelskou přívětivost ovládání. Mechanický návrh jednotky bude proveden v 3D software. Pro mechanickou konstrukci přístroje je možné využít 3D tisku. Firmware mikropočítače bude realizován v jazyce C, ve vhodném vývojovém software, například Microchip Studia, nebo vývojového software vývojového kitu. Kompletní realizace jednotky bude provedena na úrovni prototypového řešení, včetně funkčního testování. Součástí práce bude rešerše tematického zaměření práce, kompletní výrobní dokumentace vlastního konstrukčního řešení, okomentované zdrojové kódy firmware mikropočítače a podrobný uživatelský manuál.

Rozsah pracovní zprávy: **40**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR – 3. díl – edice uP a praxe 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4  
MATOUŠEK, D., Aplikace ATmega644, BEN – technická literatura, 2013, ISBN 978-80-7300-492-7  
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4  
GREPL, R., Modelování mechatronických systémů v Matlab/SimMechanics, BEN-technická literatura, 2007, ISBN 978-80-7300-226-8

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2023**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**Ing. Daniel Honc, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 9. ledna 2023

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 5. 2023

Dominik Jand'ourek

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné rady a vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za psychickou i finanční podporu po celou dobu mého studia.

V Pardubicích dne 12. 5. 2023

Dominik Jand'ourek

**Anotace**

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací digitální měřicí jednotky pro odměřování polohy a úhlů laboratorních přístrojů. Práce obsahuje teoretickou část zabývající se vlastnostmi a druhy enkodérů. V praktické části je popsána kompletní realizace digitální jednotky včetně softwaru a podrobného uživatelského manuálu.

**Klíčová slova**

Enkodér, Arduino, měřicí jednotka, poloha, úhel

**Title**

Digital measuring unit

**Annotation**

The bachelor's thesis deals with the design and implementation of a digital measuring unit for measuring the position and angles of laboratory instruments. The thesis contains a theoretical part dealing with the properties and types of encoders. The practical part describes the complete implementation of the digital unit, including software and a detailed user manual.

**Keywords**

Encoder, Arduino, unit of measurement, position, angle

# Obsah

Seznam zkratk .....	10
Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	13
Úvod .....	14
1 Rešerše komerčně dostupných digitálních měřících jednotek .....	15
1.1 Digitální odměřovací jednotka od firmy Warco .....	15
1.2 Digitální měřič délky .....	15
2 Enkodéry .....	17
2.1 Inkrementální enkodér .....	17
2.2 Absolutní enkodér .....	17
2.2.1 Grayův kód .....	18
2.2.2 Tvorba Grayova kódu .....	19
2.3 Rotační enkodér .....	20
2.4 Optický rotační enkodér .....	20
2.4.1 Příklad optického enkodéru .....	22
2.5 Mechanický rotační enkodér .....	23
2.6 Magnetické rotační enkodéry .....	24
2.6.1 Magnetické enkodéry s mnohapólovým diskem .....	25
2.6.2 Magnetické enkodéry s dvoupólovým magnetem .....	26
2.6.3 Příklad magnetického enkodéru .....	26
2.7 Kapacitní rotační enkodéry .....	27
2.8 Režim 1X, 2X a 4X .....	28
2.9 Lineární enkodéry .....	29
2.9.1 Optický lineární enkodér .....	29
2.9.2 Magnetický lineární enkodér .....	30
3 Blokové schéma .....	31

4	Použité komponenty .....	32
4.1	Technický popis parametrů konstrukce, výběr komponent .....	32
4.2	Arduino UNO .....	32
4.2.1	Vývojová platforma Arduino .....	32
4.2.2	Arduino UNO .....	33
4.2.3	Napájecí obvody modulu Arduina UNO .....	34
4.2.4	Napájení přes souosý konektor .....	35
4.2.5	Napájení přes piny VIN a GND .....	35
4.2.6	Napájení přes USB port .....	35
4.3	Napájecí zdroj .....	36
4.4	LCD displej 20x4 .....	37
4.5	I <sup>2</sup> C převodník pro LCD 20x4 a 16x2 .....	37
4.6	Modul KY-040 .....	38
4.7	Tlačítka .....	39
5	Firmware mikropočítače .....	40
5.1	Vývojový diagram .....	40
5.2	Arduino IDE .....	46
5.3	Základní nastavení .....	47
5.4	Funkce setup .....	48
5.5	Funkce loop .....	49
6	Uživatelský manuál .....	52
7	Konstrukce .....	57
7.1	Schéma zapojení měřicí jednotky .....	57
7.2	Připojení enkodéru .....	57
7.3	Testovací zapojení .....	57
7.4	Přístrojová krabice .....	58
7.4.1	Osazení přístrojové krabice .....	59



7.5	Finální podoba Digitální měřící jednotky .....	60
8	Funkční testování Digitální měřící jednotky .....	61
	Závěr .....	64
	Literatura.....	65

## Seznam zkratek

DC	stejnsměrný proud
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – nevolatilní paměť
FLASH	programová paměť
GND	uzemnění
HIGH	logická úroveň jedna
IDE	integrated development environment – integrované vývojové prostředí
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit – poloduplexní multi-masterová synchronní sériová sběrnice
ISCP	In Circuit Serial Programming – standardizovaná skupina pinů určená pro programování
LCD	Liquid Crystal Display – displej z tekutých krystalů
LED	Light Emitting Diode – světelná dioda
LOW	logická úroveň nula
LR	regulátor napětí
OFF-ON	vypnuto-zapnuto
PC	personal computer – osobní počítač
PWM	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
RJ11	registred jack 11 – konektor kabelu
SCL	vodič I <sup>2</sup> C sběrnice pro data
SDA	vodič I <sup>2</sup> C sběrnice pro hodinový signál
SMD	typ montáže součástky na plošný spoj – povrchová montáž
SRAM	datová paměť
TTL	tranzistorově tranzistorová logika
WIFI	bezdrátová komunikace
ZIP	souborový formát pro kompresi dat

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Digitální odměřovací jednotka D60-2M s optickým lineárním snímačem polohy (Primadilna, nedatováno).....	15
Obr. 2 – Digitální měřič délky (LaskaKit, nedatováno) .....	16
Obr. 3 – Princip detekce směru otáčení inkrementálních enkodérů (Hůla, 2021).....	17
Obr. 4 – Disky rotačního absolutního enkodéru, vlevo disk s 8bitovým binárním kódem, vpravo disk s 8bitovým Grayovým kódem (Figie, nedatováno).....	18
Obr. 5 – Porovnání Binárního a Grayova kódu (Figie, nedatováno).....	19
Obr. 6 – Tvorba Grayova kódu, zrcadlový obraz (Rozsival, 2012).....	19
Obr. 7 – Tvorba Grayova kódu, přidání sloupce (Rozsival, 2012).....	19
Obr. 8 – Tvorba Grayova kódu (Rozsival, 2012) .....	19
Obr. 9 – Možnost připojení rotačních enkodérů, připojení s hřídelí vlevo a s dutinkou vpravo (Vojáček, 2017) .....	20
Obr. 10 – Princip rotačního optického inkrementálního enkodéru (Vojáček, 2006).....	21
Obr. 11 – Princip rotačního optického absolutního enkodéru, č. 1 je hřídel enkodéru, č. 2 je zdroj světla, č. 3 je osm optických přijímačů (Vojáček, 2017) .....	22
Obr. 12 – Optický enkodér SERIE 30I INOX (Megatron, nedatováno) .....	23
Obr. 13 – Signály A a B z enkodéru (Youngblood, 2015) .....	24
Obr. 14 – Princip Hallova jevu, vlevo bez působení magnetického pole, vpravo při kolmém působení magnetického pole na destičku (Hůla, 2021) .....	24
Obr. 15 – Disk magnetického enkodéru (Collins, 2015) .....	25
Obr. 16 – Magnetický enkodér se snímačem proti hřídeli, písmena A, B, C, a D označují Hallovy elementy (Kirchner, 2018) .....	26
Obr. 17 – Magnetický enkodér QR30-360PI-CK (Megatron, nedatováno) .....	27
Obr. 18 – Kondenzátor (Celera, nedatováno) .....	27
Obr. 19 – Princip kapacitního enkodéru (Hůla, 2021).....	28
Obr. 20 – Režimy enkodérů 1X, 2X a 4X (Lewotsky, 2019).....	29
Obr. 21 – Optický lineární enkodér (Akm, nedatováno) .....	30
Obr. 22 – Magnetický lineární enkodér (Reserchgate, nedatováno) .....	30
Obr. 23 – Blokové schéma.....	31
Obr. 24 – Komponenty na desce Arduino UNO (Voda, 2015) .....	33
Obr. 25 – Zapojení obvodů napájení Arduina Uno (Svoboda, nedatováno) .....	35
Obr. 26 – Varianty zapojení napájení Arduino Uno (Svoboda, nedatováno).....	36

Obr. 27 – Napájecí zdroj doplněný o přepínač .....	36
Obr. 28 – I <sup>2</sup> C sběrnice (Zavavov, 2014) .....	38
Obr. 29 – I <sup>2</sup> C adaptér pro LCD displej (Černý, 2015).....	38
Obr. 30 – Modul KY–040.....	39
Obr. 31 – Tlačítko (Shobby, nedatováno).....	39
Obr. 32 – Vývojový diagram – začátek programu a void setup().....	40
Obr. 33 – Vývojový diagram – void loop(), enkodér a výběr menu.....	41
Obr. 34 – Vývojový diagram – Menu1 .....	42
Obr. 35 – Vývojový diagram – Menu2 výběr rozlišení.....	43
Obr. 36 – Vývojový diagram – Menu3 .....	44
Obr. 37 – Vývojový diagram – Menu4.....	45
Obr. 38 – Vývojový diagram – Menu5 a Menu6.....	46
Obr. 39 – Vývojové prostředí Arduino IDE .....	47
Obr. 40 – Definování knihoven v programu .....	47
Obr. 41 – Zapisování do EEPROM .....	48
Obr. 42 – DebounceDelay .....	48
Obr. 43 – Setup .....	49
Obr. 44 – Vzorce pro výpočet polohy a úhlu.....	50
Obr. 45 – Ošetření neplatného stisknutí.....	50
Obr. 46 – Přejít z MENU0 na MENU5 .....	51
Obr. 47 – Po pěti zmáčknutích tlačítka – se hodnota bude zmenšovat o pět.....	51
Obr. 48 – Ovládání měřící jednotky .....	52
Obr. 49 – Displej měřící jednotky po zapnutí.....	53
Obr. 50 – Displej Menu1 s potvrzeným výběrem pro měření vzdálenosti .....	53
Obr. 51 – Displej Menu1 s potvrzeným výběrem pro měření úhlu .....	54
Obr. 52 – Displej Menu2 s potvrzeným výběrem rozlišení 4X .....	54
Obr. 53 – Displej Menu3 s vybranou vzdáleností 0,7 mm na otáčku enkodéru.....	55
Obr. 54 – Displej Menu3 s vybraným počtem 15 pulzů na otáčku enkodéru.....	55
Obr. 55 – Na čtvrtém řádku se zobrazuje naměřená hodnota v tomto případě 1,25 mm .....	56
Obr. 56 – Displej Menu5 s vynulovanou hodnotou na čtvrtém řádku.....	56
Obr. 57 – Schéma zapojení měřící jednotky .....	57
Obr. 58 – Konektor RJ11 .....	57
Obr. 59 – Testovací zapojení .....	58
Obr. 60 – Krabička typu KP9 (Kradex, nedatováno) .....	59

Obr. 61 – Zapojení uvnitř měřicí jednotky .....	59
Obr. 62 – Digitální měřicí jednotka vrchní část.....	60
Obr. 63 – Digitální měřicí jednotka levý bok .....	60
Obr. 64 – Digitální měřicí jednotka pravý bok .....	60
Obr. 65 – Laboratorní přístroj.....	61
Obr. 66 – Odchylka mezi posuvným měřítkem a digitální jednotkou.....	62
Obr. 67 – Digitální měřicí jednotka připojená k laboratornímu přístroji.....	63

## **Seznam tabulek**

Tab. 1 – Piny LCD displeje 20x4 (Malý, 2017) .....	37
Tab. 2 – Naměřené hodnoty digitální měřicí jednotkou .....	61
Tab. 3 – Naměřené hodnoty digitální měřicí jednotkou – opakovatelnost.....	62
Tab. 4 – Technické parametry .....	64

## Úvod

Odměrování polohy a úhlu hraje v našem každodenním životě stále větší roli, je zastoupeno v automobilech, našich domácnostech a nejvíce pak v průmyslové automatizaci. Stroje a zařízení se neobejdou bez odměrování polohy, vzdálenosti a úhlu. K odměrování polohy a úhlu se používají snímače, které detekují cílový objekt, osobu, látku nebo narušení magnetického či elektrického pole a převádějí tento fyzikální parametr na elektrický výstup. V průmyslových zařízeních, kde se měří délka, pozice, rychlost, úhel natočení nebo všechny veličiny, které na ně lze převést, se stále častěji používají rotační senzory, takzvané enkodéry. V teoretické části práce budou popsány vlastnosti a hlavní druhy enkodérů.

Cílem práce je vytvořit digitální měřicí jednotku pro odměrování polohy a úhlů laboratorních přístrojů využívajících kvadrurních inkrementálních snímačů. Hodnota polohy nebo úhlu se bude zobrazovat na LCD displeji. Digitální jednotka bude řízena pomocí vývojového kitu Arduino UNO. Měřicí jednotku se bude dát připojit pomocí konektoru RJ11 ke skoro jakémukoli laboratornímu přístroji osazenému enkodérem s konektorem RJ11. Na laboratorním přístroji proběhne i kompletní otestování měřicí jednotky.

# 1 Rešerše komerčně dostupných digitálních měřících jednotek

Bylo nalezeno několik komerčně dostupných digitálních měřících jednotek, které jsou svou funkcí podobné praktické části bakalářské práce. Je to například digitální odměřovací jednotka od firmy Warco, digitální měřič délky prodejce LaskaKit a v neposlední řadě digitální měřící kolečko, které známe také pod názvem policejní.

## 1.1 Digitální odměřovací jednotka od firmy Warco

Tato jednotka slouží hlavně jako odměřovací systém pro soustruhy, frézy a jiné obráběcí stroje. Prodává se ve variantě Warco D60-2M pro měření ve dvou osách a Warco D60-3M pro tříosé měření. Jednotka je kompletně utěsněná, aby byly elektronické okruhy ochráněny proti nebezpečným látkám jako je prach, chladivo anebo třísky. K jednotce lze připojit jakýkoliv snímač polohy, jak lineární, tak rotační. Standardně jsou dodávány s vysoce kvalitními optickými lineárními snímači od firmy Warco. Rozlišení lze nastavit v rozsahu: 0,1 $\mu$ m, 0,2 $\mu$ m, 2,5 $\mu$ m, 5 $\mu$ m a 10 $\mu$ m (Primadilna, nedatováno).



Obr. 1 – Digitální odměřovací jednotka D60-2M s optickým lineárním snímačem polohy (Primadilna, nedatováno)

## 1.2 Digitální měřič délky

Tento měřič délky nalezne uplatnění všude tam, kde je třeba měřit délku, např. v textilním, papírenském průmyslu a procesu výroby kabelů, drátů, trubek, nebo pásů. Jako snímač délky se používá reverzibilní fotoelektrický senzor (Rotační enkodér MB-E-500), který dosahuje přesnosti 0,2 % a má velkou odolnost proti rušení. Díky velkému rozsahu nastavení

lze použít měřicí kolečka téměř jakéhokoli průměru. Samotný šestimístní digitální přístroj je určen k montáži do panelu (LaskaKit, nedatováno). Digitální měřič na český trh dodává firma LaskaKit.



Obr. 2 – Digitální měřič délky (LaskaKit, nedatováno)

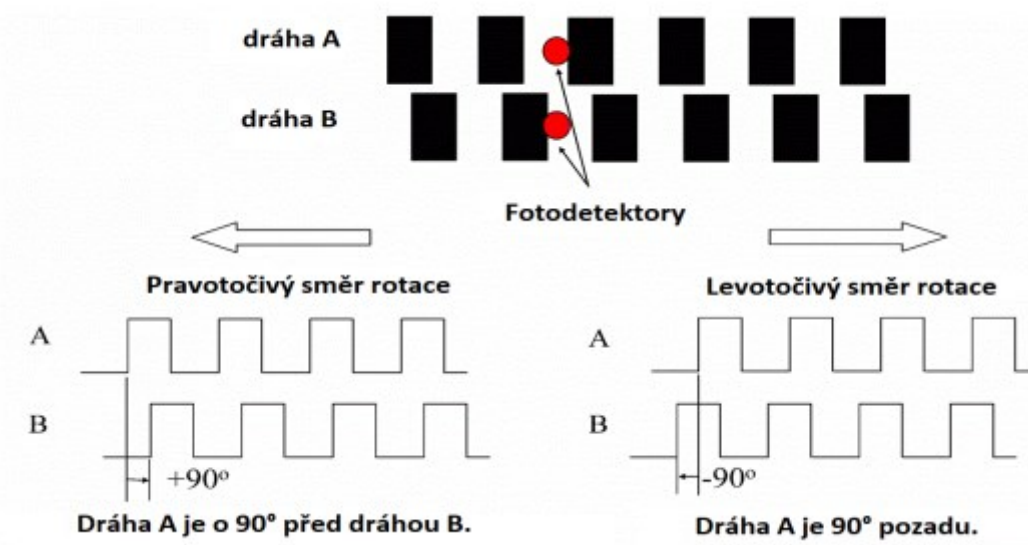


## 2 Enkodéry

Enkodér je senzor, který snímá polohu a tuto informaci převádí na elektronický signál. Enkodéry se rozlišují podle provedení na lineární a rotační. U lineárních enkodérů se snímá posun, u rotačních se snímá úhel natočení. Enkodéry se dále dělí na inkrementální a absolutní. Enkodéry se mohou dělit i z hlediska fyzikálního principu na optické, magnetické, mechanické, kapacitní a indukční (Janoušek, 2021).

### 2.1 Inkrementální enkodér

Inkrementální enkodér generuje sled pulzů. Tento typ enkodéru nedává přímou informaci o aktuální poloze. Inkrementální enkodér většinou generuje dva obdélníkové signály A a B, které jsou oproti sobě posunuté o 90 stupňů. Tyto signály se nazývají kvadrurní, proto se můžeme setkat i s názvem kvadrurní enkodér (Locker, 2009). Zpracováním prvního obdélníkového signálu A získáme počet pootočení, z toho lze zjistit rychlost otáčení. Zpracováním druhého signálu B se získá informace o směru otáčení. Inkrementální enkodér může mít i další signál Z, který udává referenční neboli nulovou polohu enkodéru. Výstup enkodéru při pohybu generuje 4 různé stavy. Nejlehčí způsob, jak převést uvedené signály na srozumitelné číslo, je použít čítač s možností čítání nahoru a dolů (Vojáček, 2006).

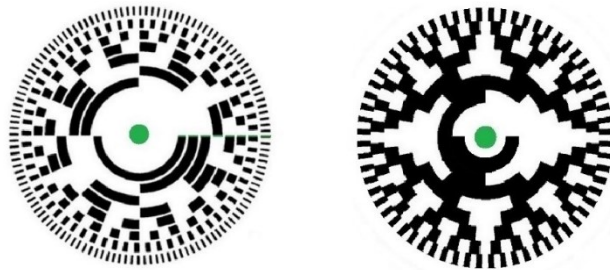


Obr. 3 – Princip detekce směru otáčení inkrementálních enkodérů (Hůla, 2021)

### 2.2 Absolutní enkodér

Absolutní enkodér je oproti inkrementálnímu enkodéru složitější, protože generuje unikátní kódy. Pro každou pozici je přiřazena konkrétní hodnota kódu, proto poskytují okamžitou informaci o aktuální poloze. Tato informace je k dispozici vždy, když je připojeno napájení a je uchována i po odpojení napájení, což je výhoda absolutních enkodérů. Dojde-li ke

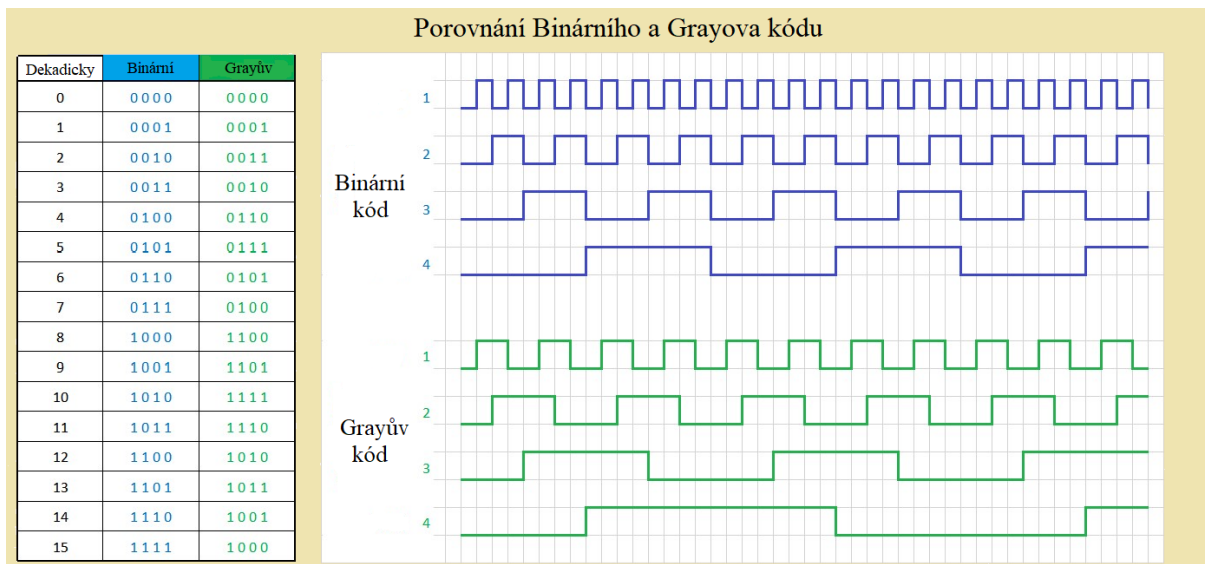
změně pozice enkodéru při vypnutém napájení, tak na rozdíl od inkrementálních enkodérů, neztratí absolutní polohu. U absolutních rotačních enkodérů tedy není po zapnutí nutná referenční otáčka. Absolutní rotační enkodéry se rozdělují na jednootáčkové a víceotáčkové. Víceotáčkové informují o poloze i rámci vícero otáček (Schmachtl, nedatováno). Rozlišení absolutních rotačních enkodérů je dáno počtem kódů na otáčku. Například osmibitový enkodér má na jednu otáčku 256 pozic. Nejčastěji využívané typy kódování jsou binární kód a Grayův kód. Kódování binárním kódem je principem jednoduché a dobře srozumitelné, ale u enkodérů nevýhodné, je totiž náchylné na generování hazardních stavů (Figie, nedatováno).



Obr. 4 – Disky rotačního absolutního enkodéru, vlevo disk s 8bitovým binárním kódem, vpravo disk s 8bitovým Grayovým kódem (Figie, nedatováno)

### 2.2.1 Grayův kód

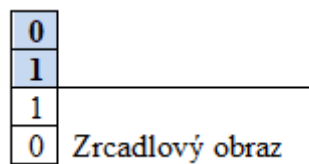
Binární kód má nevýhodu, že při přechodu z některých hodnot na následující nebo předchozí hodnoty musí změnit více bitových hodnot najednou. Například při přechodu z čísla 7, binárně 0111, na číslo 8, binárně 1000, nebo obráceně z čísla 8 na číslo 7 se mění více než jedna bitová hodnota. V uvedeném příkladě se musí změnit hodnoty všech čtyřech bitů. Tyto změny musí proběhnout přesně ve stejný okamžik, aby nedošlo ke generování hazardních stavů. Tento požadavek je mnohdy technicky neproveditelný. Proto při zpracování těchto dat může docházet k chybám. Aby se vyloučil tento druh chyb, používá se Grayův kód. U tohoto kódu se při změně číselné hodnoty, tedy při zvětšení nebo zmenšení, mění vždy hodnota pouze jednoho bitu. Tím je zabráněno chybovosti při velkých bitových přechodech, a také proto se tomuto kódu říká kód s jednou změnou (Vacek, nedatováno). Tomuto kódu se také říká zrcadlový, a to z důvodu jakým je Grayův kód tvořen.



Obr. 5 – Porovnání Binárního a Grayova kódu (Figie, nedatováno)

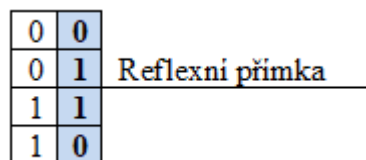
## 2.2.2 Tvorba Grayova kódu

Grayův kód sestavujeme z dvojkových číslic s použitím zrcadlení:



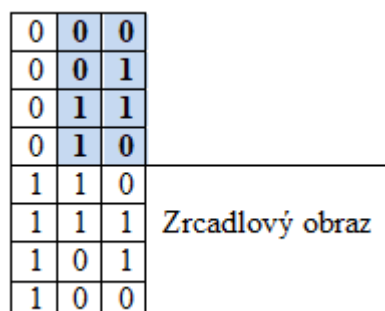
Obr. 6 – Tvorba Grayova kódu, zrcadlový obraz (Rozsival, 2012)

Doplňme 0 před čísla nad reflexní přímkou a 1 pod přímkou:



Obr. 7 – Tvorba Grayova kódu, přidání sloupce (Rozsival, 2012)

Přemístíme reflexní přímku na konec, vytvoříme zrcadlový obraz a doplníme 0 a 1:



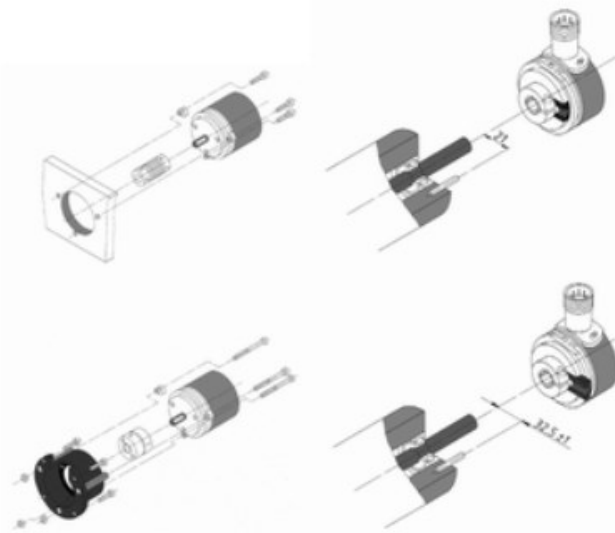
Obr. 8 – Tvorba Grayova kódu (Rozsival, 2012)

Takovýto postup lze opakovat a vytvořit tak Grayův kód s libovolným počtem bitů (Rozsival, 2012).

### 2.3 Rotační enkodér

Rotační enkodér je typ snímače, který se využívá pro měření délky, pozice úhlu nebo veličin, které na ně lze převést. Převádějí mechanický pohyb na elektrické signály ať už analogové nebo digitální. Může sloužit jako náhrada za víceotáčkové potenciometry. Běžně používané rotační enkodéry mohou být inkrementální nebo absolutní (Paštyka, 2017).

Rotační enkodéry lze dělit i podle mechanické konstrukce na enkodéry s hřídelí a enkodéry bez hřídele neboli s dutinkou. Verze s dutinkou se používají z důvodu snadnějšího napojení na systémy s vlastní hřídelí, jako jsou například motory. U verze s dutinkou tím odpadá použití spojek (Vojáček, 2017).



Obr. 9 – Možnost připojení rotačních enkodérů, připojení s hřídelí vlevo a s dutinkou vpravo (Vojáček, 2017)

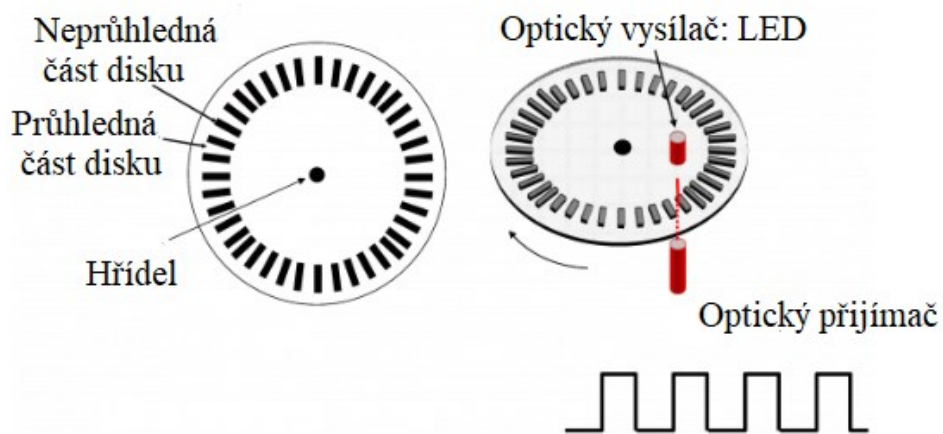
### 2.4 Optický rotační enkodér

Optický rotační enkodér je elektromechanický převodník, který převádí rotační pohyb na posloupnost impulsů. K tomu využívá principu optické závory. Optická vazba optočlenu je vytvářena diskem, který má opticky průchozí a neprůchozí plochy, nebo plochami, které jsou odrazné a neodrazné. Běžný optický rotační enkodér se skládá z těchto hlavních částí:

- Hřídele enkodéru,
- Disku s posloupností opticky průhledných a neprůhledných částí, anebo odrazných a neodrazných plošek,

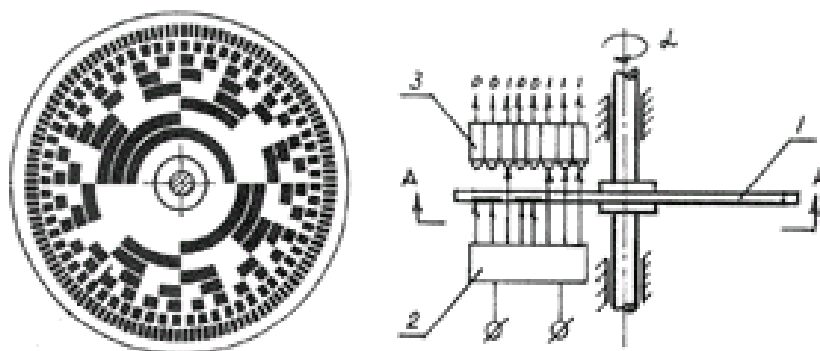
- Optickým vysílačem, to je nejčastěji LED dioda, která vysílá světlo buď ve viditelném, nebo v infračerveném spektru,
- Optickým přijímačem, což bývá fototranzistor nebo fotodioda,
- Popřípadě může být součástí enkodéru i optika, která slouží pro zaostření optického paprsku.

Princip funkce tohoto typu enkodéru je zhruba následující: Disk je spojen s hřídelí enkodéru, z toho plyne, že disk se otáčí současně s hřídelí. Světelný zdroj nejčastěji LED dioda je umístěn před diskem. Světlo, které vysílá světelný zdroj, může procházet skrz disk pouze přes průhledná okénka. Neprůhledná část disku světlo pohlcuje. Otáčením disku vznikají světelné impulsy, které aktivují optický přijímač, který je umístěn na druhé straně disku. Optický přijímač tyto impulsy převede na elektrické impulsy, nebo obdélníkový signál. Pro zajištění generování obdélníkových signálů se musí elektrický signál zesílit a elektronicky zpracovat. U reflexních enkodérů jsou zdroj světla i optický přijímač na jedné straně disku. Na disku jsou umístěny reflexní a matné plošky. Střídání těchto plošek je příčinou změny napětí způsobené změnou detekovaného světla. Na přijímači se tak dostane obdélníkový signál, kde každý obdélník přísluší, buď reflexní, nebo matné ploše. Enkodér, který produkuje pravidelný obdélníkový signál, se nazývá inkrementální.



Obr. 10 – Princip rotačního optického inkrementálního enkodéru (Vojáček, 2006)

Optické rotační enkodéry mohou být i absolutní. Toho je dosaženo tak, že každá poloha rotačního disku má svoji jedinečnou kombinaci impulsů. Absolutní optické rotační enkodéry potřebují větší počet optických přijímačů. Počet optických přijímačů odpovídá rozlišení enkodéru. Například při provedení, které je na obrázku 11, kde disk obsahuje 8 paralelních drah, tak rozlišení je 8 bitů. Pro detekci je tedy potřeba zdroj světla a 8 optických přijímačů, každý přijímač má vlastní dráhu. Disk na obrázku využívá standardní binární kód.



Obr. 11 – Princip rotačního optického absolutního enkodéru, č. 1 je hřídel enkodéru, č. 2 je zdroj světla, č. 3 je osm optických přijímačů (Vojáček, 2017)

Binární kód není však na využití v enkodérech ideální, je totiž náchylný na generování hazardních stavů, například při přechodu ze stavu 01 má být další stav 10, ale krátce může být stav na disku 00. Příčinou může být například nedokonalé provedení disku nebo optické jevy jako je odraz, ohyb nebo stín světla, které prochází od optického vysílače k přijímači. Čím je větší rozlišení enkodéru, tím je větší pravděpodobnost vzniku hazardních stavů (Vojáček, 2006). U binárního kódování se totiž při větším rozlišení mění několik bitů najednou. Proto se využívá Grayova kódu, ten při každém přírůstku změní pouze jeden bit. Tím je snížena chybovost mezi velkými bitovými přechody, které má binární kód (Figie, nedatováno).

Výhodou optických enkodérů je vysoké rozlišení. Další výhodou je, že tento typ enkodérů je velmi stabilní vůči vnějším magnetickým vlivům a také velmi nízký jitter signálu (Megatron, 2022). Nevýhodou optických enkodérů je, že spoléhají na přímou viditelnost mezi přijímačem a zdrojem světla, proto jsou náchylné na znečištění například prachem nebo olejem. Další nevýhodou je, že optické disky jsou často vyrobeny ze skla nebo plastu, tudíž jsou náchylné na poškození vibracemi. Životnost optických enkodérů je omezena životností LED diody (Elektrolab, 2022).

#### 2.4.1 Příklad optického enkodéru

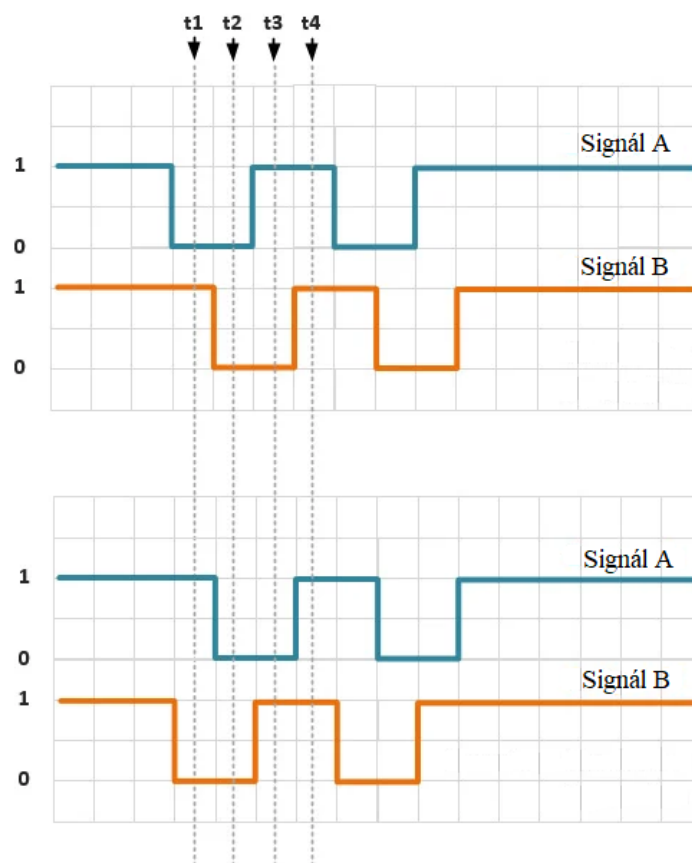
Inkrementální optický enkodér SERIE 30I INOX od výrobce Hoher Automation, GmbH, obchodní zastoupení v ČR je MEGATRON, s.r.o., má rozsah 50000 pulzů na otáčku, krytí IP67. Materiál těla i hřídele o průměru 12 mm je z nerezové oceli. Je odolný vůči vibracím i otřesům (Megatron, nedatováno).



Obr. 12 – Optický enkodér SERIE 30I INOX (Megatron, nedatováno)

## 2.5 Mechanický rotační enkodér

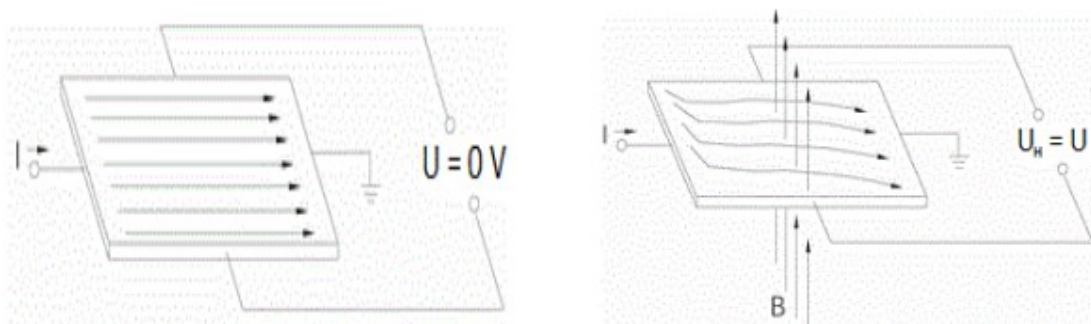
Uvnitř mechanického enkodéru jsou dva spínače. Tyto spínače se při otáčení hřídele enkodéru spínají a rozepínají, čímž vznikají kvadrurní signály. Při otočení tohoto typu enkodéru je cítit a slyšet cvakání, které je způsobeno mechanickou konstrukcí, kdy mechanické kontakty přeskakují z jedné polohy do druhé. Počítáním jednotlivých sepnutí se určí, jak moc se zatočilo s hřídelí enkodéru. K zjištění směru otáčení enkodéru se musí využít signály z obou spínačů. V klidovém stavu mohou být například oba signály ve stavu HIGH. Při otočení jedním nebo druhým směrem oba výstupy přeskočí z HIGH do LOW a zpět. Kontakty uvnitř enkodéru jsou vzájemně posunuté, proto otočením jedním směrem přeskočí dřív signál A a při otočení druhým směrem přeskočí dřív signál B. Proto stačí kontrolovat, zda při změně signálu A z LOW na HIGH je signál B LOW nebo HIGH a podle toho rozhodnout o přičtení nebo odečtení jedničky (Obdržálek, 2020). Hlavní výhodou mechanických enkodérů je jejich cenová dostupnost. Nevýhodou pak, že oproti optickým enkodérům mají většinou menší rozlišení a omezenou životnost.



Obr. 13 – Signály A a B z enkodéru (Youngblood, 2015)

## 2.6 Magnetické rotační enkodéry

Magnetické enkodéry jsou často založeny na fyzikálním principu Hallova jevu (Hůla, 2021). Hallův jev se zakládá na vychylování směru elektrického proudu v závislosti na velikost indukce magnetického pole působící kolmo na polovodičovou destičku neboli Hallův element. Výsledkem je generování Hallova napětí na stranách destičky, které je úměrné velikosti působícího magnetického pole a jeho kolmosti k destičce (Vojáček, 2007).



Obr. 14 – Princip Hallova jevu, vlevo bez působení magnetického pole, vpravo při kolmém působení magnetického pole na destičku (Hůla, 2021)



Pokud je magnetická indukce kolmá na destičku, je Hallovo napětí dáno vztahem (1):

$$u_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_C \cdot B \quad (1)$$

$u_H$  je Hallovo napětí, V

$R_H$  je Hallova konstanta,  $\text{m}^3 / \text{C}$

$d$  je tloušťka polovodičové destičky, m

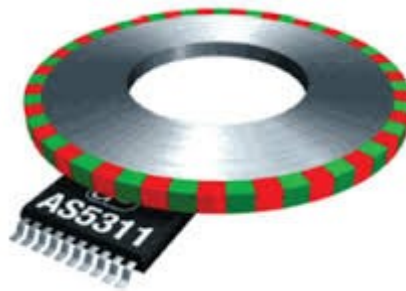
$I_C$  je elektrický proud protékající destičkou, A

$B$  je magnetická indukce kolmá ke směru působení elektrického proudu, T (Hůla, 2021).

Jako detektor v magnetických enkodérech se nejčastěji používají Hallovy snímače. Už Hallův element je sám o sobě vlastně snímač magnetického pole. Hallův snímač je tedy Hallův element doplněný o elektroniku, která zesílí, upraví, standardizuje a také stabilizuje napájecí napětí pro generování konstantního proudu. Konstantní proud je důležitý pro to, aby se změna Hallova napětí rovnala pouze změně hodnoty indukce magnetického pole (Vojáček 2007). Magnetické rotační enkodéry existují ve dvou základních provedeních, a to s mnohapólovým magnetizovaným diskem, u kterého se senzor nachází mimo osu hřídele, a dvoupólovým magnetem, který má senzor proti ose hřídele.

### 2.6.1 Magnetické enkodéry s mnohapólovým diskem

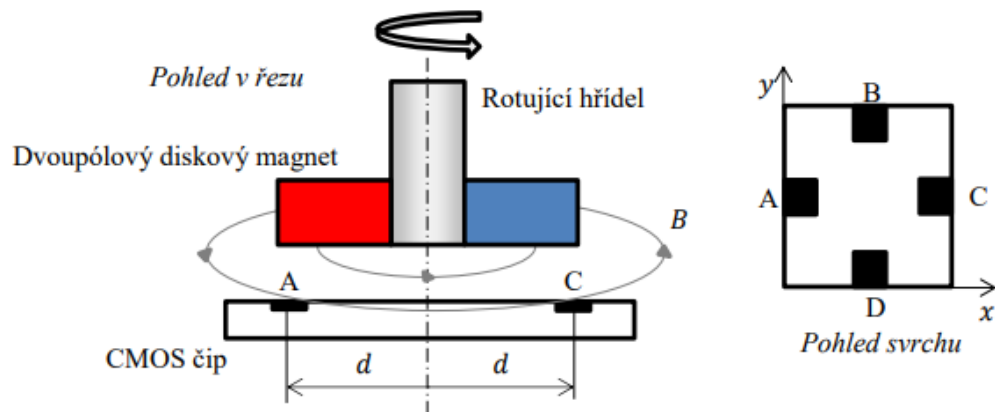
Princip funkce je u tohoto typu enkodéru podobný jako u rotačních optických enkodérů. Ale u magnetických enkodérů se, místo zdroje světla a optických přijímačů, využívá magnetického pole a nejčastěji Hallova senzoru. Na hřídeli enkodéru je umístěn magnetizovaný disk. Disk má po obvodě střídavě severně a jižně magnetizované části, na obrázku č. 15 jsou tyto části znázorněny zelenou a červenou barvou. Vně tohoto disku je Hallova sonda, která generuje harmonický signál. Tento signál se zesílí a převede na obdélníkový signál. Výstupem je tedy podobný signál jako u optických inkrementálních enkodérů. Rozlišení rotačního magnetického enkodéru s mnohapólovým diskem je dáno počtem pólu na disku.



Obr. 15 – Disk magnetického enkodéru (Collins, 2015)

### 2.6.2 Magnetické enkodéry s dvoupólovým magnetem

Tento typ má na ose enkodéru umístěn dvoupólový magnet a proti němu Hallův senzor. Dvoupólový magnet během otáčení hřídele vytváří točivé magnetické pole, které je detekováno čtyřmi Hallovými elementy, které jsou rozmístěny ve vzdálenosti  $d$  od osy magnetu. Při rotaci magnetu se na každém z Hallových elementů vytváří sinusové napětí. Napětí jsou od sebe navzájem posunutá o devadesát stupňů. Z těchto čtyř napětí je možné vypočítat absolutní úhel natočení enkodéru, což je výhoda oproti enkodéru s mnohapólovým diskem. Výhodou tohoto typu je menší velikost, která je způsobena umístěním snímačů nad hřídel enkodéru, oproti enkodérům s mnohapólovým diskem, kde je senzor umístěn mimo hřídel, což negativně ovlivňuje jejich velikost (Kirchner, 2018).



Obr. 16 – Magnetický enkodér se snímačem proti hřídeli, písmena A, B, C, a D označují Hallovy elementy (Kirchner, 2018)

Výhodou magnetických enkodérů je, že nejsou citlivé na měnící se vlivy prostředí, jako je teplota, nebo vlhkost. Další výhodou je schopnost provozu v nepříznivých podmínkách, jako je zaolejované, nebo jinak znečištěné prostředí. Také není citlivý na vibrace. Nevýhodou je citlivost na vnější magnetická pole (Megatron, nedatováno).

### 2.6.3 Příklad magnetického enkodéru

Magnetický enkodér QR30-360PI-CK vyrábí holandská firma DIS Sensor, jejíž obchodní zástupce v ČR je MEGATRON, s.r.o. Enkodér má rozlišení 1024 pulzů na otáčku, napájecí napětí 8–30 V DC a krytí IP67. Vzdálenost magnetu od senzoru je 0–2 mm, magnet se nachází na zadní straně enkodéru (Megatron, nedatováno).



Obr. 17 – Magnetický enkodér QR30-360PI-CK (Megatron, nedatováno)

## 2.7 Kapacitní rotační enkodéry

Princip funkce kapacitních enkodérů spočívá na změně kapacity detekované pomocí vysokofrekvenčního referenčního signálu. Toho je dosaženo pomocí tří hlavních částí kapacitního enkodéru, kterými jsou stacionární vysílač, rotor a stacionární přijímač. Kapacitní enkodéry mohou existovat i v provedení s pouze dvěma částmi, kde jedna část je rotor a druhá část je vysílač kombinovaný s přijímačem. Desky přijímače a vysílače jsou kapacitně vázány a kapacita je úměrná dielektrickému materiálu mezi dvěma nabitými deskami (Collins, 2015).

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (2)$$

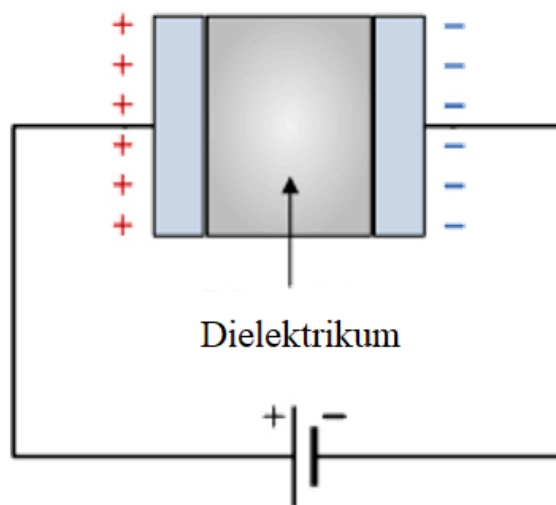
kde  $C$  je kapacita, F

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  je permitivita vakua, F/m

$\epsilon_r$  je relativní permitivita materiálu dielektrika,

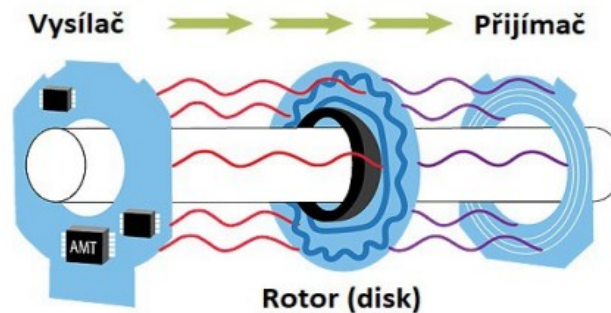
$S$  je plocha elektrod,  $m^2$

$d$  je vzdálenost odpovídající tloušťce dielektrika, m (Hůla, 2021).



Obr. 18 – Kondenzátor (Celera, nedatováno)

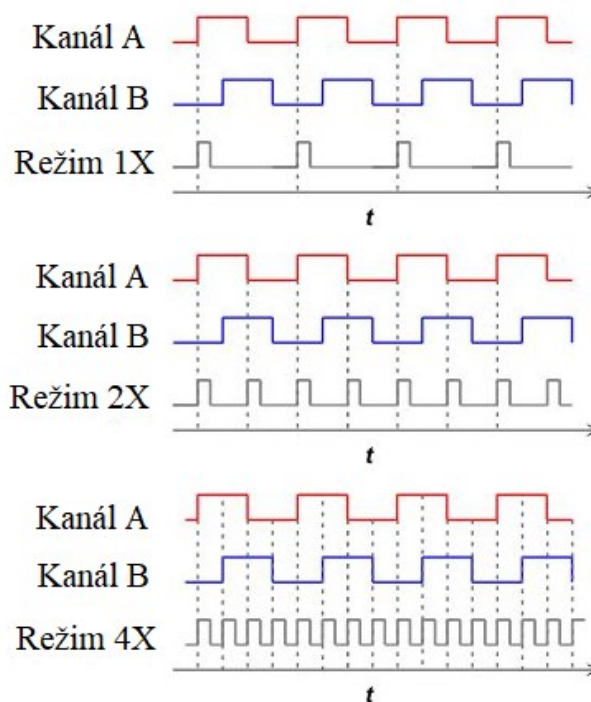
Na rotorové části enkodéru je vyleptaný sinusový vzor, který při otáčení rotoru způsobuje změnu dielektrika  $\epsilon_r$ , což způsobuje změnu kapacity. Změna kapacity moduluje vysokofrekvenční signál vysílaný stacionárním vysílačem. Přijímač přečte modulovaný signál a vnitřní elektronika jej převede na přírůstky rotačního pohybu. Vnitřní elektronika také produkuje kvadrurní signály pro inkrementální kódování. Výhodou kapacitních enkodérů je malá spotřeba energie a velká citlivost. Nevýhodou tohoto typu enkodérů je, že kapacita se mění s teplotou a vlhkostí, proto jsou na tuto změnu citlivé (Celera, nedatováno).



Obr. 19 – Princip kapacitního enkodéru (Hůla, 2021)

## 2.8 Režim 1X, 2X a 4X

U enkodérů s kvadrurním výstupem lze použít tři typy dekódování a to 1X, 2X a 4X. Rozdíl mezi těmito typy dekódování je v tom, které hrany signálu a z kterého signálu během pohybu enkodéru počítají. Při režimu 1X tedy jednonásobném rozlišení se počítá jen náběžná, nebo jen sestupná hrana signálu z kanálu A. Při použití režimu 2X, tedy při dvojnásobném rozlišení, se počítají náběžné i sestupné hrany kanálu A. Tím se zdvojnásobí počet pulzů, které se počítají pro každý pohyb enkodéru a tím se tedy i zdvojnásobí rozlišení enkodéru. U režimu 4X se počítají náběžné i sestupné hrany signálů z obou kanálů tedy, jak z kanálu A, tak z kanálu B.



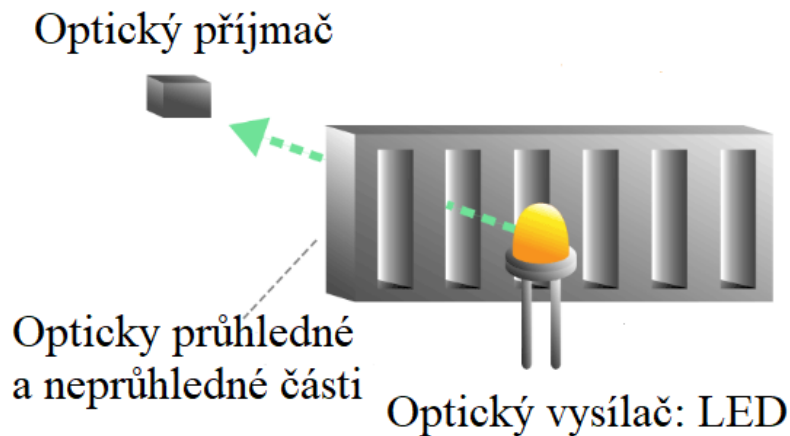
Obr. 20 – Režimy enkodérů 1X, 2X a 4X (Lewotsky, 2019)

## 2.9 Lineární enkodéry

Lineární enkodér je snímač, který měří lineární pohyb objektu. Lineární enkodéry mohou být jak absolutní, tak i inkrementální. Lineární enkodéry nejčastěji využívají optického nebo magnetického principu. Tento typ enkodérů se skládá ze čtecí hlavy, ve které je umístěn senzor, a pásce, podél které se čtecí hlava pohybuje.

### 2.9.1 Optický lineární enkodér

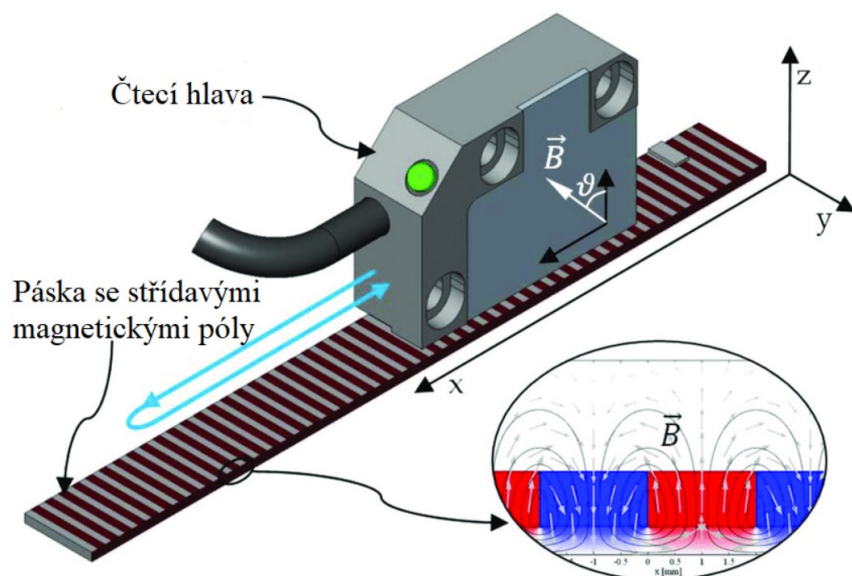
Lineární optický enkodér využívá stejného principu jako optický rotační enkodér. Světelný zdroj svítí skrz opticky průhledné a neprůhledné části, nebo na opticky odrazné a neodrazné plochy. Rozdíl je v tom, že opticky průhledné a neprůhledné části jsou umístěny na pásce, po které se pohybuje čtecí hlava enkodéru. Světlo může procházet pouze skrz opticky průhledné části na pásce. Pohybem čtecí hlavy po pásce tak vzniká signál. Podle toho, jaký je na pásce vzor, tak je enkodér buď inkrementální, nebo absolutní.



Obr. 21 – Optický lineární enkodér (Akm, nedatováno)

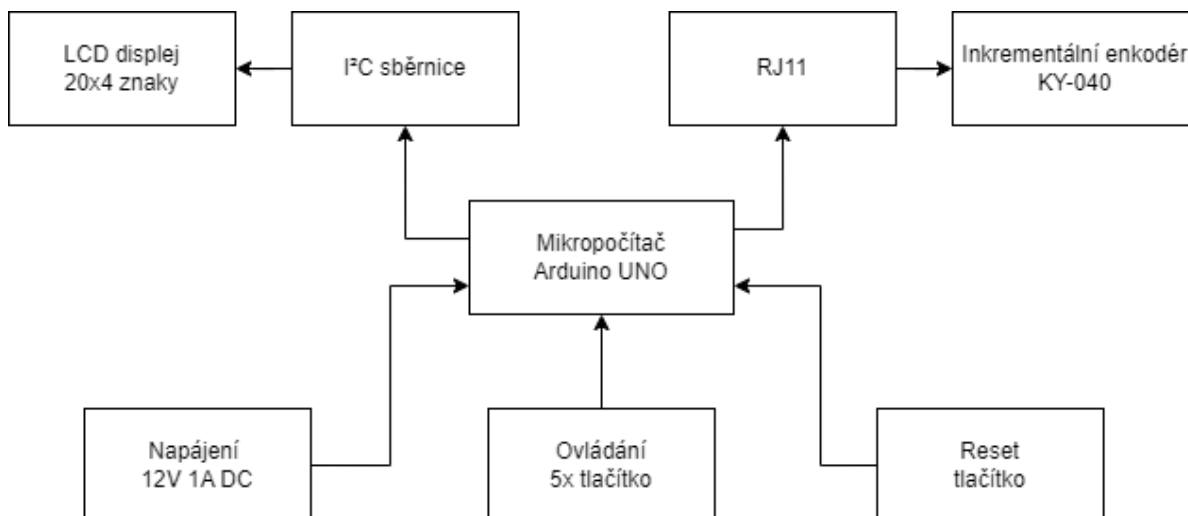
### 2.9.2 Magnetický lineární enkodér

Magnetické lineární enkodéry používají čtecí hlavu s Hallovými nebo magnetorezistivními senzory. Na pásce, po které se čtecí hlava pohybuje, se střídá magnetická polarita. Jak se čtecí hlava pohybuje po pásce, detekuje změnu magnetického pole. Tím vzniká analogový signál, který je poté převeden a zesílen. Jednou z hlavních výhod magnetických lineárních enkodérů je, že magnetická stupnice může být dlouhá až 50 metrů. Aby bylo možné měřit absolutní polohu, tak magnetické enkodéry obvykle využívají dvě magnetické stopy – přírůstkovou a absolutní stopu (Collins, 2018).



Obr. 22 – Magnetický lineární enkodér (Reserchgate, nedatováno)

### 3 Blokové schéma



Obr. 23 – Blokové schéma

## 4 Použité komponenty

### 4.1 Technický popis parametrů konstrukce, výběr komponent

Digitální měřicí jednotka je určena pro měření polohy a úhlu pomocí inkrementálních snímačů. Jako základní prvek digitální měřicí jednotky bylo zvoleno Arduino UNO z důvodu jeho dostupnosti na trhu. Jako snímač byl zvolen mechanický enkodér EC11, který je umístěn na modulu KY-040. Tento enkodér má 15 pulzů na otáčku. Laboratorní přístroj, pro který byla měřicí jednotka určena, se za jednu otáčku enkodéru posune 0,7 mm. I při použití režimu dekódování 1X, by vzdálenost, kterou laboratorní přístroj urazí za jeden pulz enkodéru, byla menší jak 0,05 mm, což je dostatečné, a proto byl zvolen tento typ enkodéru. Enkodér byl k Arduino připojen pomocí kabelu s konektorem RJ11 z důvodu, že k připojení enkodéru jsou potřeba pouze 4 dráty. Naměřené hodnoty a nastavení se zobrazují na LCD displeji, který je k Arduino připojen přes I<sup>2</sup>C sběrnici. Displej byl zvolen o velikosti 20 sloupců a 4 řádky, který je dostačující pro přehledné zobrazení. K nastavení parametrů měřicí jednotky slouží 5 tlačítek, kterými lze vybrat měření polohy nebo úhlu, rozlišení enkodéru, vzdálenost, o kterou se posune laboratorní přístroj na jednu otáčku enkodéru, počet pulzů enkodéru na jednu otáčku enkodéru, nulování a ukládání nastavení a naměřené hodnoty do EEPROM. Vše bylo umístěno do přístrojové krabičky KP9, jejíž rozměry jsou 70x150x179 mm, což je dostatečné pro pohodlnou montáž všech použitých komponent. Napájení digitální měřicí jednotky je řešené pomocí síťového adaptéru s výstupním napětím 12 V a proudem 1 A.

Pro sestavení digitální měřicí jednotky byly použity tyto komponenty:

- Arduino UNO,
- Napájecí zdroj 12 V, 1 A,
- LCD displej 20x4,
- I<sup>2</sup>C převodník pro LCD 20x4 a 16x2,
- Modul KY-040,
- Tlačítko – 6 kusů.

### 4.2 Arduino UNO

#### 4.2.1 Vývojová platforma Arduino

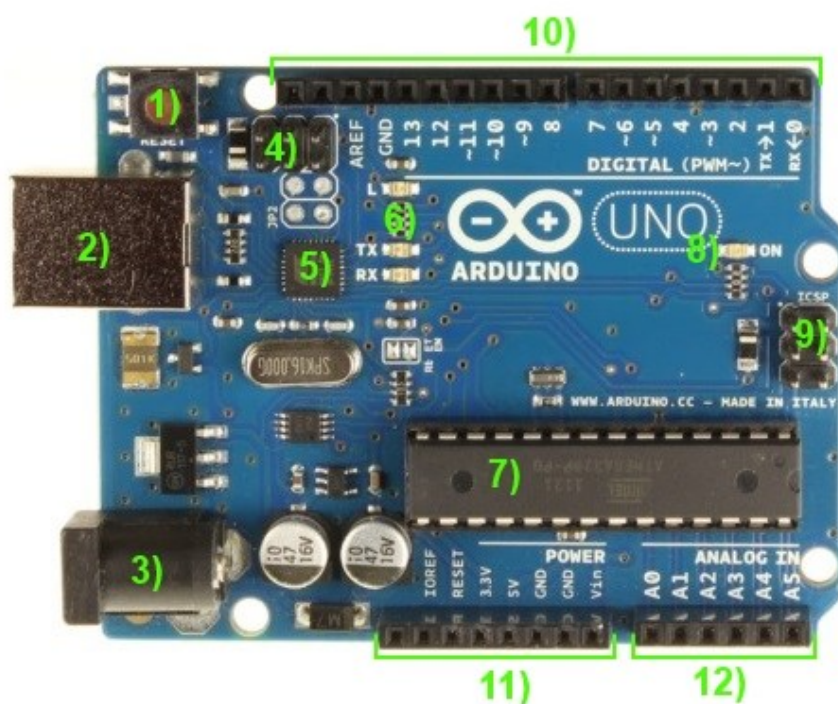
Vývojová platforma Arduino je postavená na procesorech ATmega od společnosti Atmel. Arduino začali vyvíjet lidé z italského Interaction Design Institute jako cenově dostupný



vývojový set pro studenty. Zařízení platformy Arduino se ve většině případů skládají ze základní desky s mikrokontrolérem, který je obklopen dalšími elektronickými součástkami. V dnešní době existuje velké množství různě velkých a výkonných základních desek (Voda, 2015). Tuto základní desku můžeme rozšířit o takzvané shildy. Shildy jsou snadno připojitelné periferie jako například Ethernet Shield, Wifi Shield, Motor Shield a mnoho dalších. Na většině Arduino deskách je USB rozhraní určené ke komunikaci mezi PC a čipem. Některé desky USB nemají, a proto je k jejich programování zapotřebí externí převodník, protože taková deska se nedá přímo připojit k PC (Kozina, 2015). Jedná se o open source platformu, což umožňuje bezplatný přístup k podrobné dokumentaci. Díky tomu mohlo vzniknout množství neoficiálních desek takzvaných klonů. Protože všechna schémata jsou dostupná online, může si kdokoli sestavit své Arduino. Proto se můžeme setkat s klony, které jsou tvarem i výbavou totožné s oficiálními modely, ale i s klony, které jsou modifikované pro konkrétní funkce (Voda, 2015).

#### 4.2.2 Arduino UNO

Arduino UNO je základní a nejpoužívanější deska Arduina. Arduino Uno je založené na mikrokontroléru ATmega328P s frekvencí 16 MHz. Velikost FLASH paměti je 32 kB, paměť SRAM má 2 kB a paměť EEPROM 1 kB. Má 14 digitálních vstupně/výstupních pinů, z nichž 6 lze použít jako PWM výstupy, 6 analogových vstupů. Deska dále obsahuje například USB konektor, napájecí konektor, ICSP hlavici a resetovací tlačítko (Store.arduino, nedatováno).



Obr. 24 – Komponenty na desce Arduino UNO (Voda, 2015)

- 1) Resetovací tlačítko. Po zmáčknutí tlačítka reset se program spustí od začátku.
- 2) USB konektor typu B. Využívá se k napájení a programování čipu.
- 3) Napájecí konektor. Použijeme, pokud nechceme čip napájet z USB.
- 4) ICSP hlavice pro externí přeprogramování USB serial převodníku.
- 5) USB serial převodník. Slouží ke komunikaci mezi čipem a PC.
- 6) Indikační led diody. Dioda L je připojená k pinu 13, může se využít k otestování blikání i bez externí LED diody. Diody TX a RX blikají, když po sériové lince probíhá komunikace.
- 7) ATmega328P. Hlavní čip desky Arduino UNO.
- 8) Led dioda ON. Tato dioda svítí, pokud je připojené napájení.
- 9) ICSP konektor pro možnost externího přeprogramování vnitřních pamětí použitého mikropočítače.
- 10) Vstupně/výstupní digitální piny. Vývody, které jsou označené vlnovkou, podporují PWM modulaci.
- 11) Většina těchto vývodů jsou napájecí výstupy Arduina.
- 12) Analogové vstupy, pro měření analogových signálů, například ze senzorů s analogovým výstupem měřené veličiny. Lze je použít i jako digitální vstupy a výstupy (Kozina, 2015).

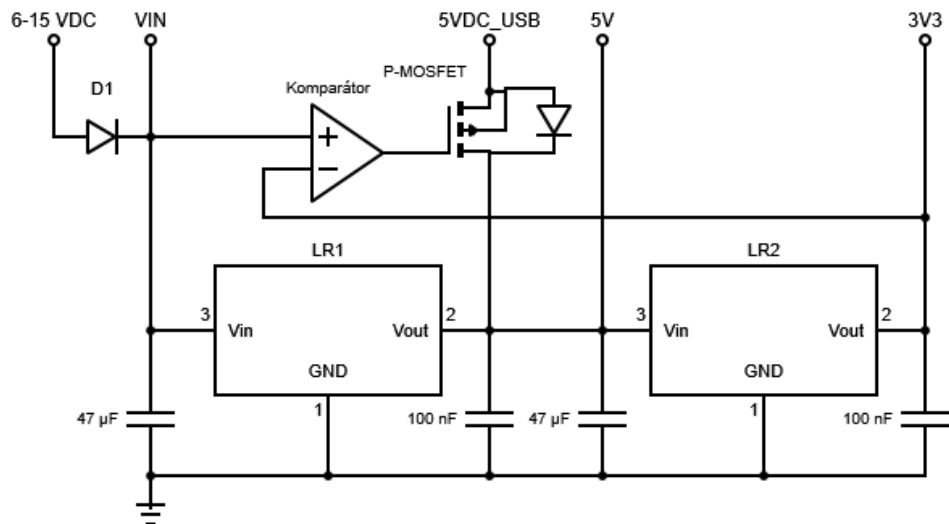
### 4.2.3 Napájecí obvody modulu Arduina UNO

Arduino je vždy napájeno ze zdroje stejnosměrného napětí. Napájecí napětí lze realizovat jednou z následujících možností:

- Napájení přes piny VIN a GND,
- Napájení přes USB port,
- Napájení přes souosý konektor.

Napájecí obvod Arduina Uno se skládá z těchto částí:

- Dioda D1, tato dioda slouží jako ochrana proti přepólování,
- Lineární regulátor napětí LR1, výstupem tohoto regulátoru je napětí 5 V,
- Lineární regulátor napětí LR2, výstupem tohoto regulátoru je napětí 3,3 V,
- Komparátor a tranzistor typu P-MOSFET, slouží k výběru vstupního zdroje napětí.



Obr. 25 – Zapojení obvodů napájení Arduino Uno (Svoboda, nedatováno)

#### 4.2.4 Napájení přes souosý konektor

Ve schématu je toto napájení označeno jako 6-15 VDC. Rozsah vstupního napětí pro napájení přes souosý konektor je 6 až 15 V. Přes souosý konektor může protékat proud až 1 A. Na vstupu se nachází dioda, která brání nechtěnému přepólování. Do souosého konektoru se většinou připojuje adaptérový zdroj, takže k přepólování dojít nemůže, ale dioda je zde pro případ, že by byl použit nějaký jiný zdroj napětí, kde k přepólování dojít může. U souosého konektoru je vnitřní kontakt kladný pól a vnější kontakt záporný pól.

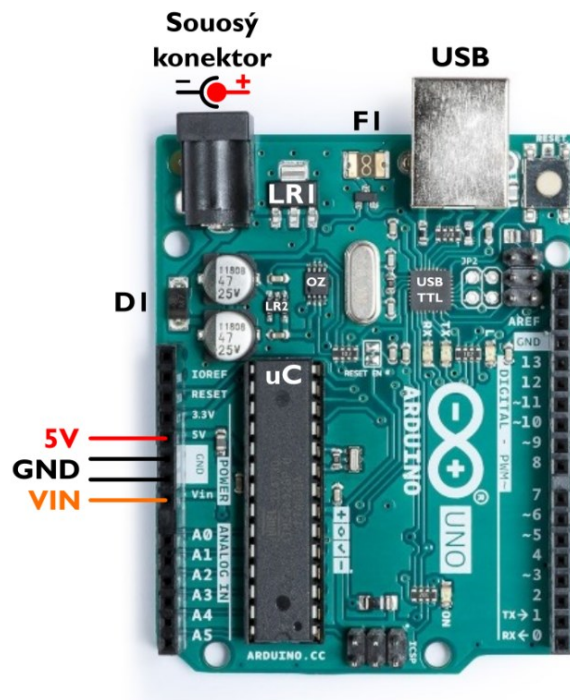
#### 4.2.5 Napájení přes piny VIN a GND

Napájení přes piny Vin a GND je podobné jako napájení přes souosý konektor s tím rozdílem, že nemá ochranu proti přepólování. Výhodou toho je, že není zapojena ochranná dioda, a tudíž nedochází k úbytku napětí na této diodě. Úbytek na diodě je přibližně 0,8 V, což je nežádoucí v případě napájení z baterie, protože by se snížila její výdrž. Pokud by došlo k zapojení baterie opačně, tak by došlo ke zničení desky a pravděpodobně by explodoval 47µF kondenzátor. Úbytek napětí na ochranné diodě má vliv i na rozsah napájecího napětí, které by mělo být 5,2 – 14,2V.

#### 4.2.6 Napájení přes USB port

Arduino Uno má na sobě USB TTL převodník, proto lze napájet přes USB port. Tato varianta se používá při programování, lze ji použít i ve finální instalaci, kde se může využít napájení pomocí zdroje například nabíječky na mobilní telefon nebo powerbanky. Výhodou této varianty je, že může být připojen i další zdroj napájení a USB je pak připojené pouze pro

programování. Rozsah napájecího napětí je 4,75 – 5,25 V. Maximální proud, který může Arduino odebrat přes USB port, je 500 mA (Svoboda, nedatováno).



Obr. 26 – Varianty zapojení napájení Arduino Uno (Svoboda, nedatováno)

### 4.3 Napájecí zdroj

Pro napájení Arduina použitého v měřicí jednotce byl zvolen způsob napájení přes souosý konektor. Byl zvolen adaptérový zdroj od výrobce Shenzhen Topow Electronics Co., Ltd. Tento zdroj má výstupní napětí 12 V a výstupní proud maximálně 1 A. Zdroj byl doplněn o dvoupólový kolíbkový vypínač 250 V 2x 1 A pro snadnější zapínání a vypínání.



Obr. 27 – Napájecí zdroj doplněný o přepínač

#### 4.4 LCD displej 20x4

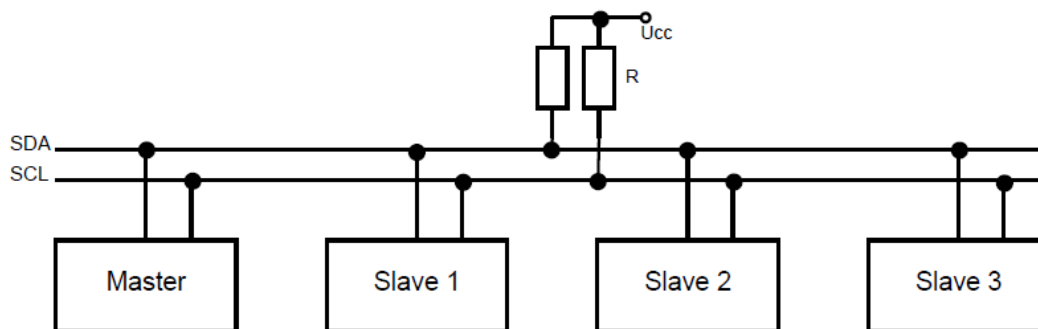
LCD displej 20x4 (20 znaků, 4 řádky) od firmy Distar je dobře použitelný v různých Arduino projektech. Tyto displeje totiž obsahují řadič typu HD44780, ke kterému existuje celá řada knihoven. Zvolený displej má černé znaky na zelenožlutém pozadí. K připojení k dalším obvodům má LCD displej 16 pájecích plošek. Napájecí napětí tohoto displeje je 5 V (Malý, 2017).

Tab. 1 – Piny LCD displeje 20x4 (Malý, 2017)

Pin	Symbol	Úroveň	Popis
1	V <sub>SS</sub>	0 V	Napájecí napětí (GND)
2	V <sub>DD</sub>	+5 V	Napájecí napětí pro logiku
3	V <sub>0</sub>	(proměnlivé)	Vstupní napětí pro řízení kontrastu LCD
4	RS	H/L	H: DATA, L: Instrukce
5	R/W	H/L	H: Čtecí mód, L: Zapisovací mód
6	E	H,H->L	Enable signál
7	DB0	H/L	Data bit 0
8	DB1	H/L	Data bit 1
9	DB2	H/L	Data bit 2
10	DB3	H/L	Data bit 3
11	DB4	H/L	Data bit 4
12	DB5	H/L	Data bit 5
13	DB6	H/L	Data bit 6
14	DB7	H/L	Data bit 7
15	LED+	+5 V	Napájecí napětí pro podsvětlení (+)
16	LED-	0 V	Napájecí napětí pro podsvětlení (-)

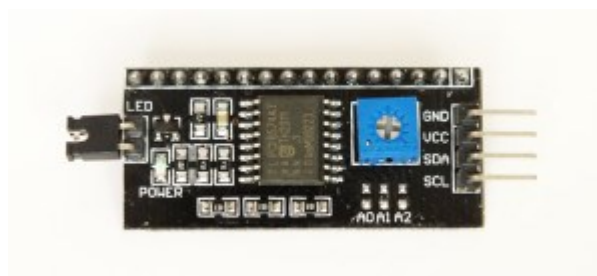
#### 4.5 I<sup>2</sup>C převodník pro LCD 20x4 a 16x2

I<sup>2</sup>C z anglického Internal Integrated Circuit se jedná o interní datovou sběrnici, která slouží pro přenos dat. Sběrnice je obousměrná, v jeden okamžik však může vysílat jen jedno zařízení, jedná se tedy o poloduplexní přenos. Zařízení na sběrnici může vystupovat, buď jako master, ten zahajuje a ukončuje komunikaci a generuje hodinový signál, nebo jako slave. Slave je zařízení, které je adresované masterem (Redakce HW serveru, 2000).



Obr. 28 – I<sup>2</sup>C sběrnice (Zavavov, 2014)

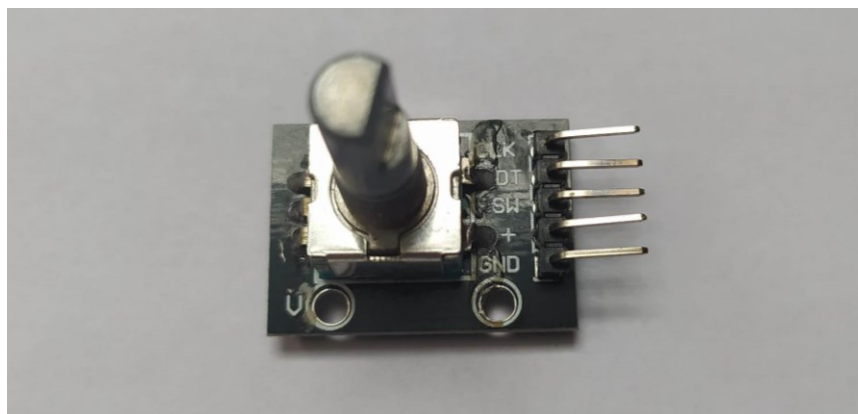
Hlavní výhodou sběrnice je, že umožňuje propojení až 128 zařízení pouze po dvou vodičích, a to po vodiči SCL (serial clock) pro hodinový signál a po vodiči SDA (serial data) pro data. To u mikrokontroléru zmenší nároky na vstupně/výstupní piny a celkově zjednoduší zapojení. Z toho důvodu byl použit I<sup>2</sup>C modul uzpůsobený pro připojení displejů 20x4 a 16x2. Na připojení displeje k mikrokontroléru tak stačí pouze čtyři vodiče. Dva vodiče jsou napájecí 5 V a GND a další dva vodiče jsou SCL a SDA I<sup>2</sup>C sběrnice. Tento modul se postará o řízení datových a řídicích signálů, obsahuje například také trimr pro nastavení jasu zobrazovaných znaků, nebo omezovací rezistor pro podsvícení displeje. Displej bude fungovat stejně jako jakákoliv jiná periférie na sběrnici I<sup>2</sup>C. Pro správné fungování této varianty připojení displeje k Arduino existuje knihovna LiquidCrystal\_I2C (Malý, 2017).



Obr. 29 – I<sup>2</sup>C adaptér pro LCD displej (Černý, 2015)

#### 4.6 Modul KY-040

KY-040 je destička, na které je mechanický inkrementální rotační enkodér typu EC11 a dva SMD pull up rezistory 10 k $\Omega$ . Modul má pět pinů, z toho dva piny jsou napájecí. Napájecí napětí je 5 V. Piny CLK a DT poskytují informaci o směru a počtu pootočení enkodéru. Rozlišení enkodéru neboli počet pulzů na otáčku je 15. Pin SW je pin tlačítka, který enkodér na modulu obsahuje. Toto tlačítko se aktivuje stiskem celé osy enkodéru (Hamblog Ok1RR, 2020). Pin CLK u tohoto enkodéru odpovídá kanálu A a pin DT odpovídá kanálu B.



Obr. 30 – Modul KY-040

#### 4.7 Tlačítka

Vybrané tlačítka jsou jednopólové OFF-ON. Jmenovité napětí 250 V a jmenovitý proud 1 A. Tlačítka byla vybrána kvůli přívětivé ceně, velikosti, designu a jednoduché montáži, jelikož má vhodný závit, díky kterému ho lze snadno namontovat na konstrukci. Pro ovládání byla vybrána žlutá tlačítka a na funkci reset červené tlačítko. Tlačítka byla popsána štítky vytištěnými na štítkovači DYMO LabelManager 210D.

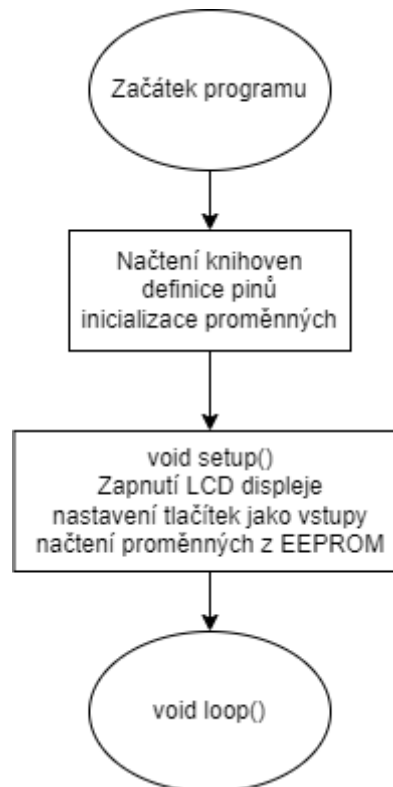


Obr. 31 – Tlačítko (Shobby, nedatováno)

## 5 Firmware mikropočítače

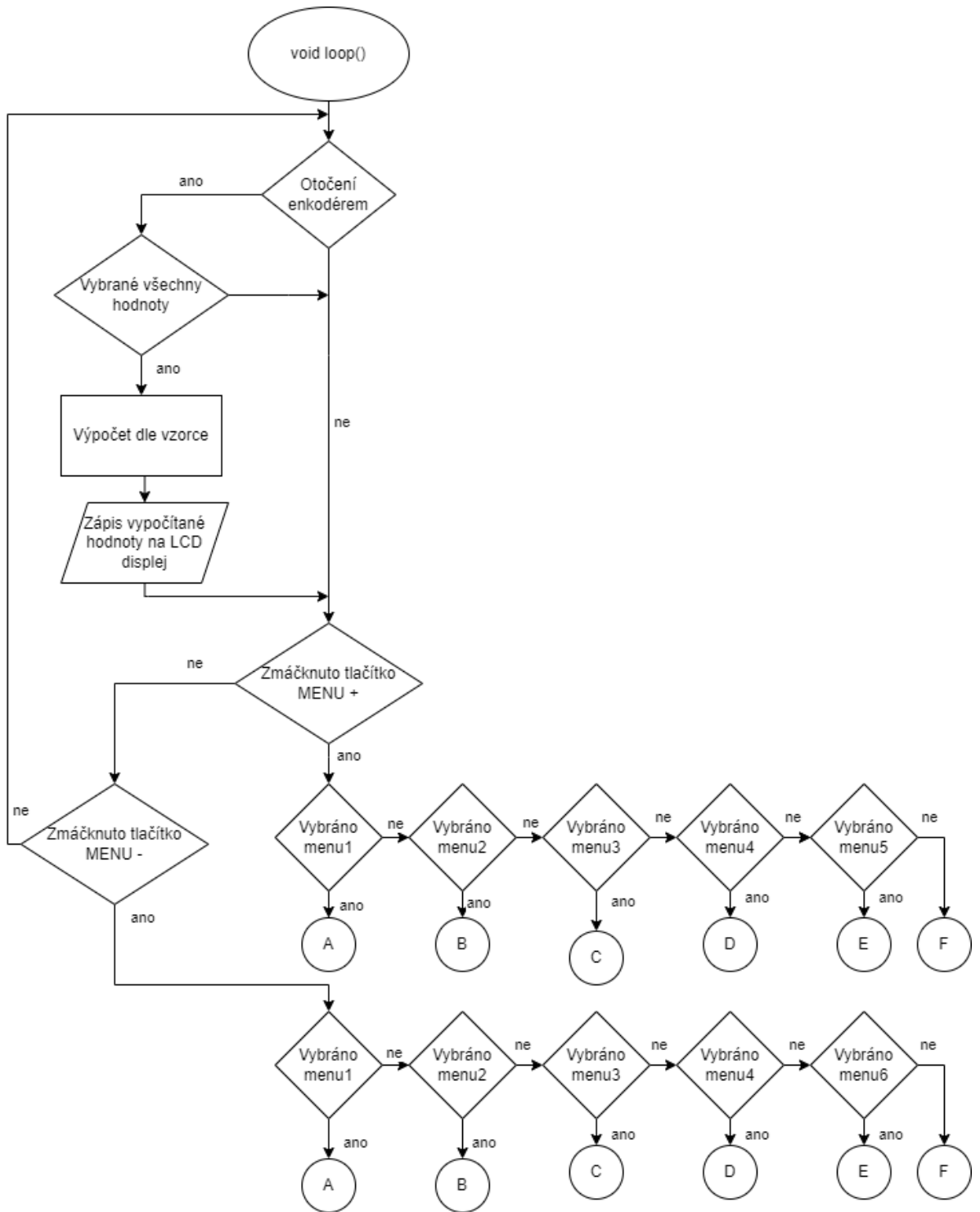
### 5.1 Vývojový diagram

Vývojový diagram je diagram, který slouží ke grafickému znázornění jednotlivých kroků algoritmu nebo obecného procesu. Je to grafické znázornění logické struktury řešeného úkolu. Vývojový diagram softwaru digitální měřicí jednotky byl vytvořen v online aplikaci diagram.drawio.

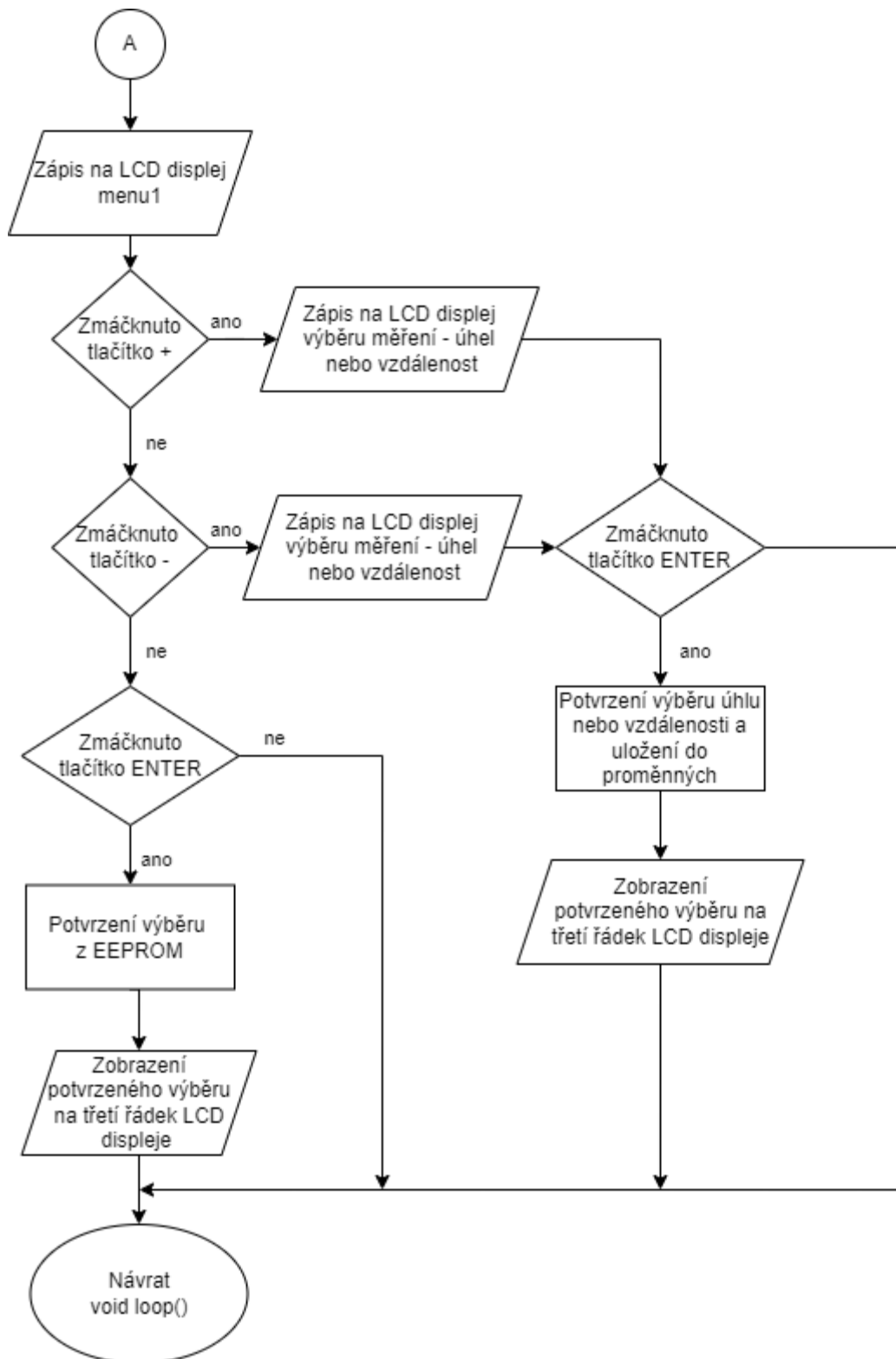


Obr. 32 – Vývojový diagram – začátek programu a void setup()

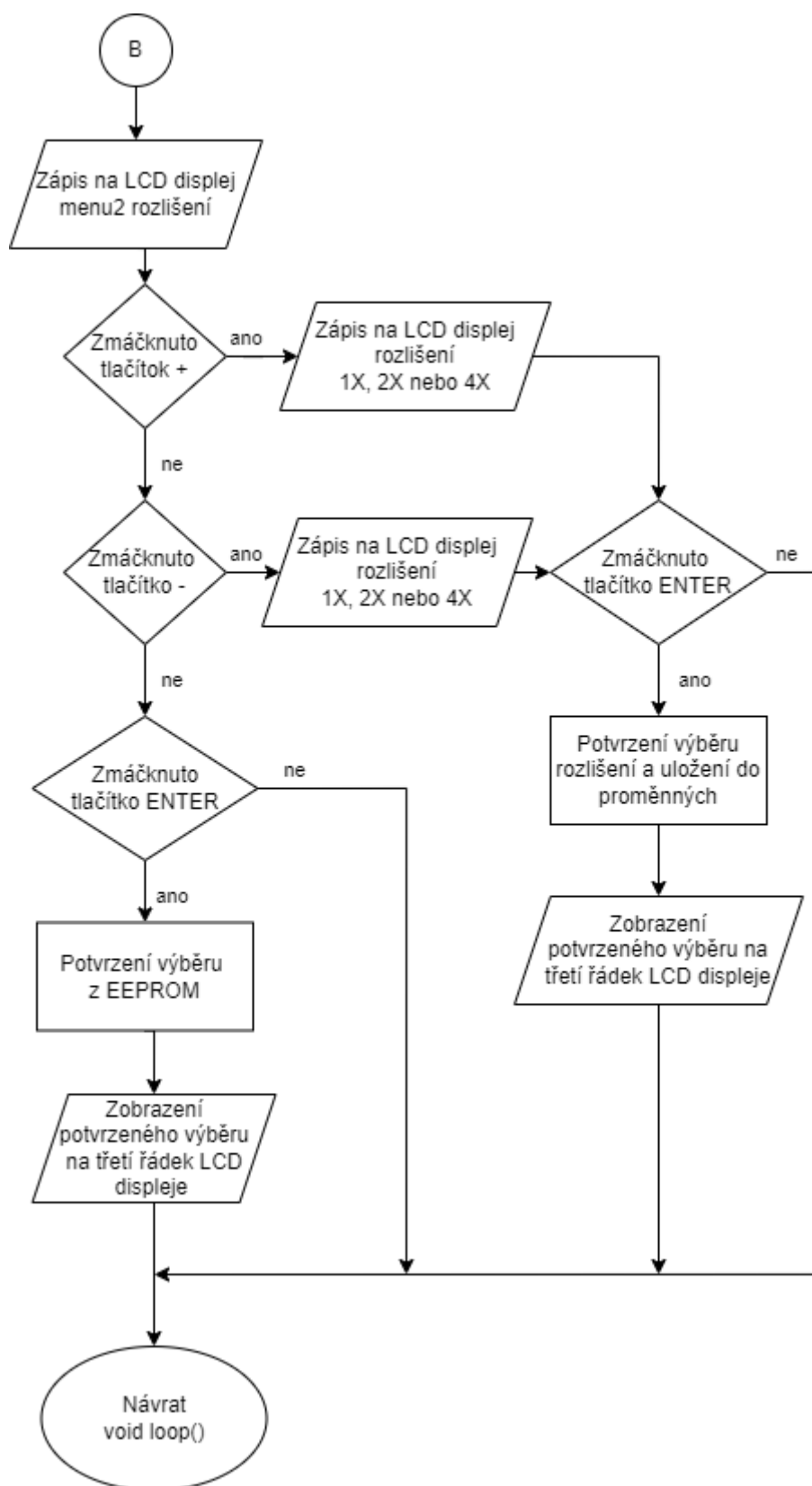




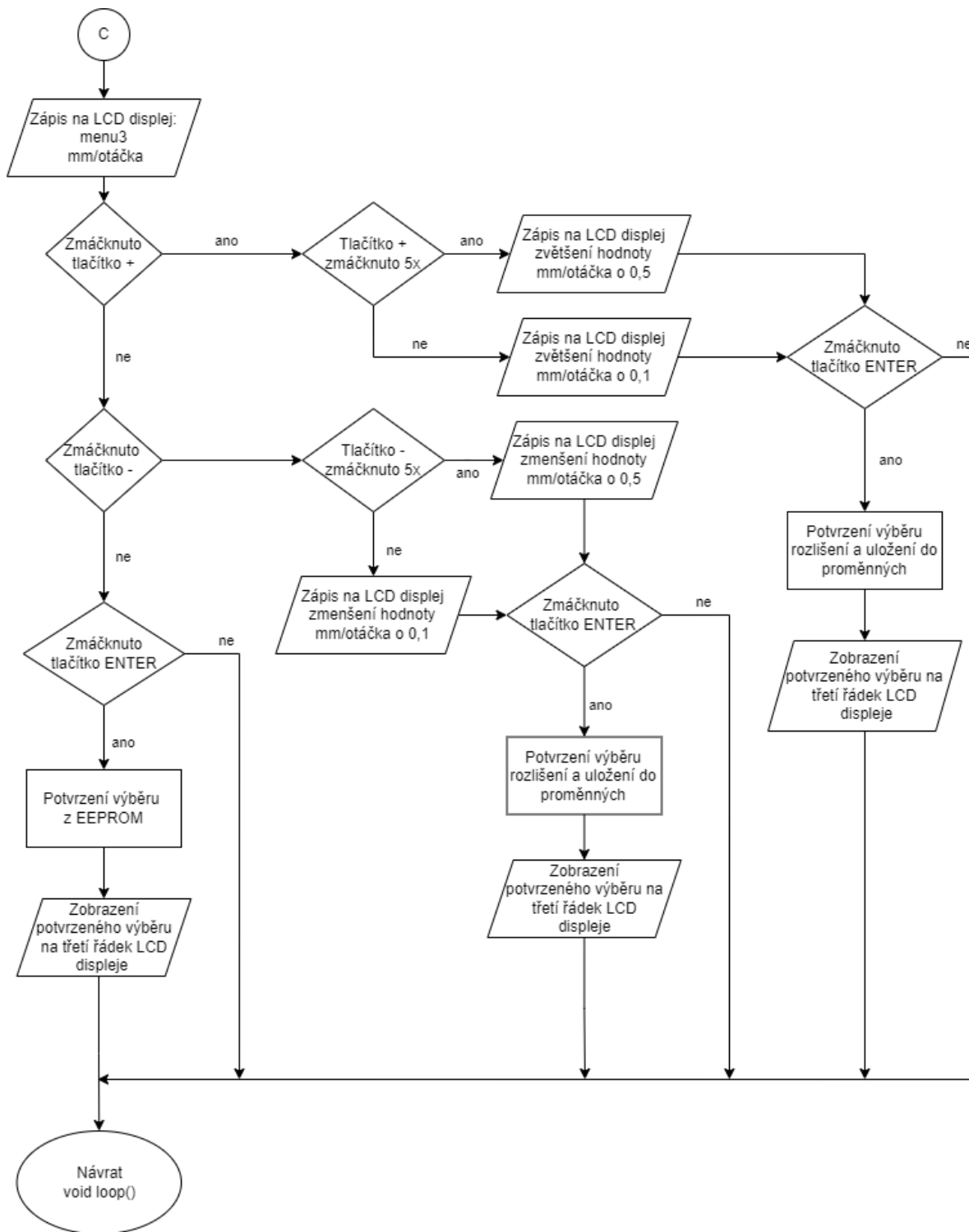
Obr. 33 – Vývojový diagram – void loop(), enkodér a výběr menu



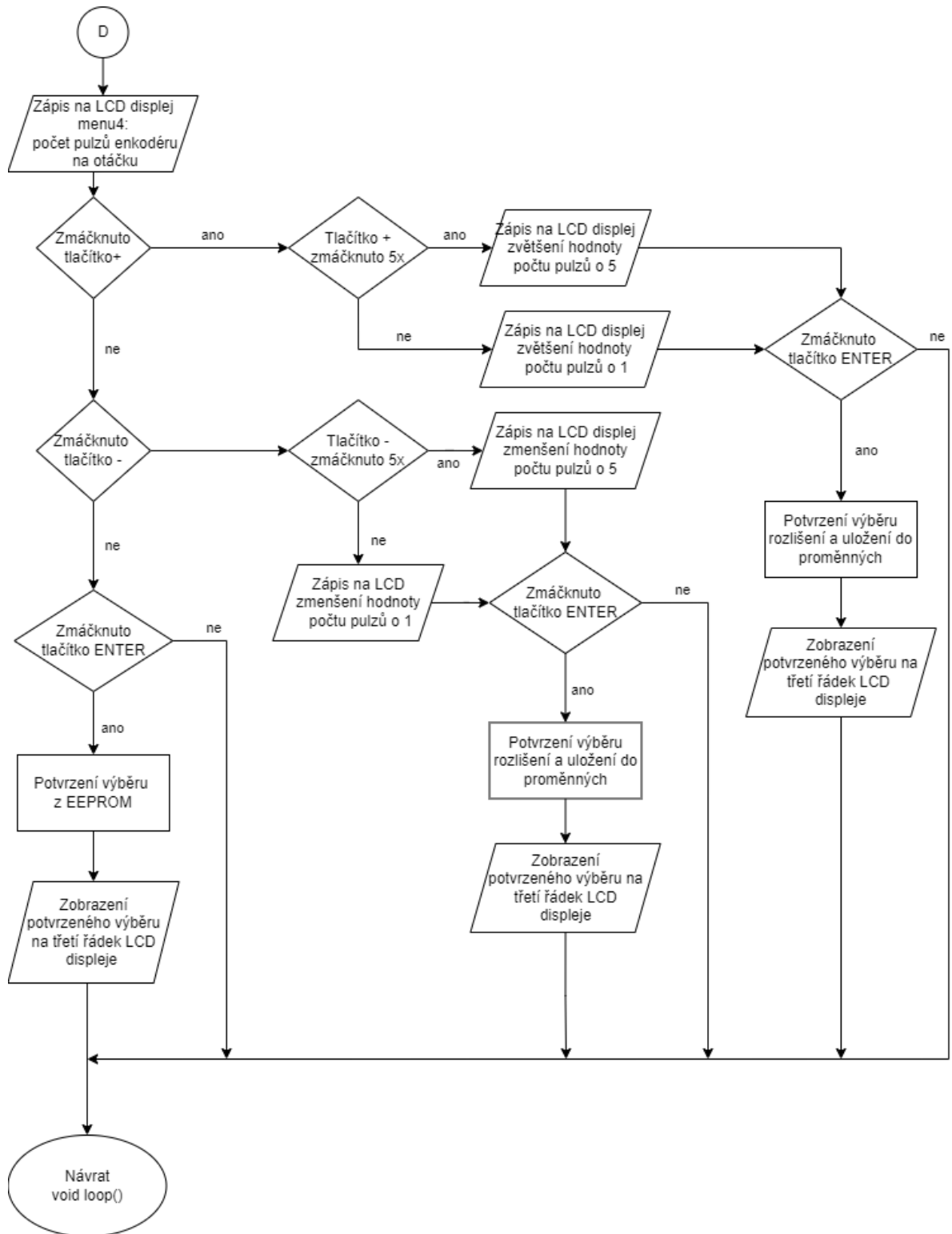
Obr. 34 – Vývojový diagram – Menu1



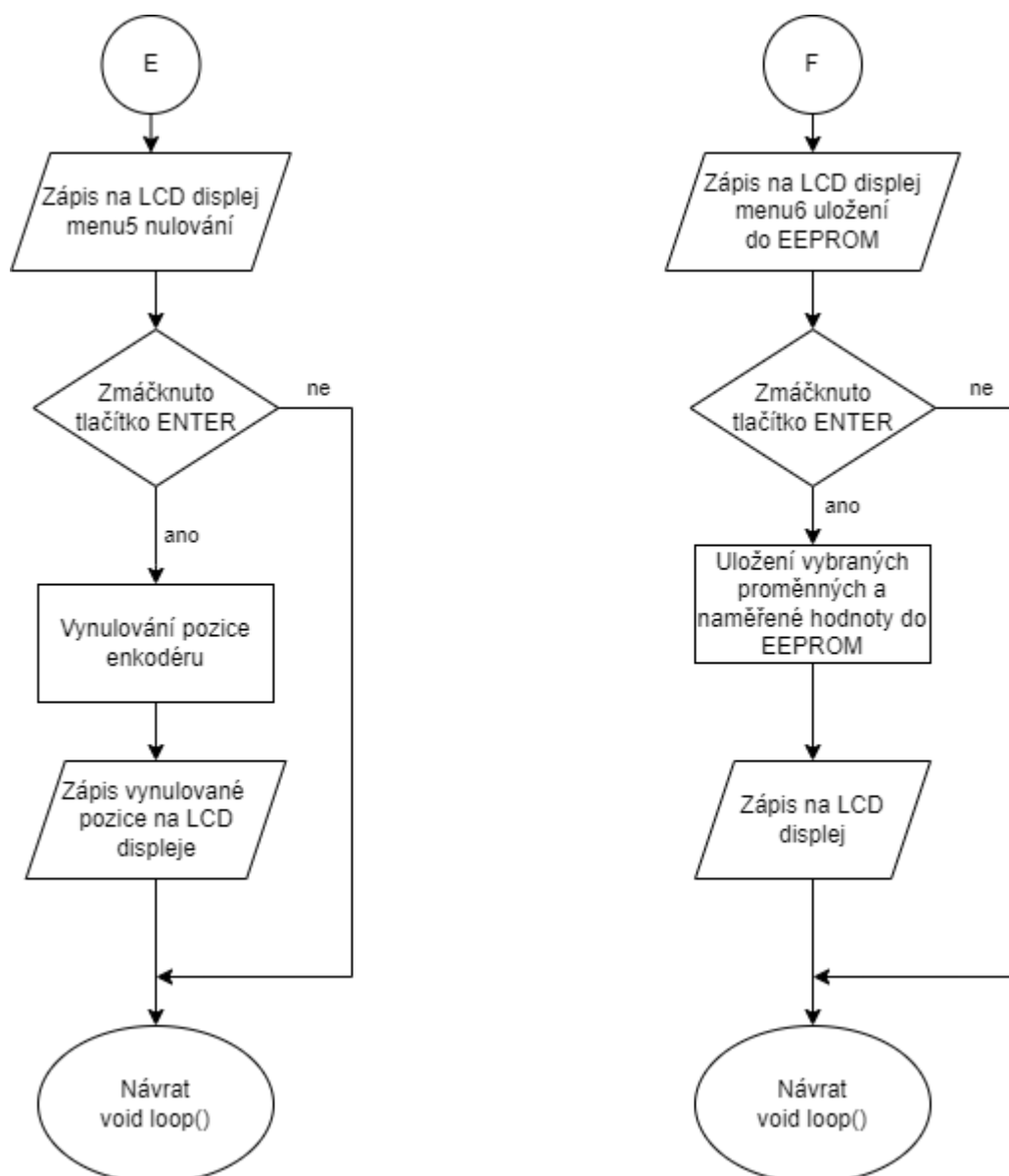
Obr. 35 – Vývojový diagram – Menu2 výběr rozlišení



Obr. 36 – Vývojový diagram – Menu3



Obr. 37 – Vývojový diagram – Menu4

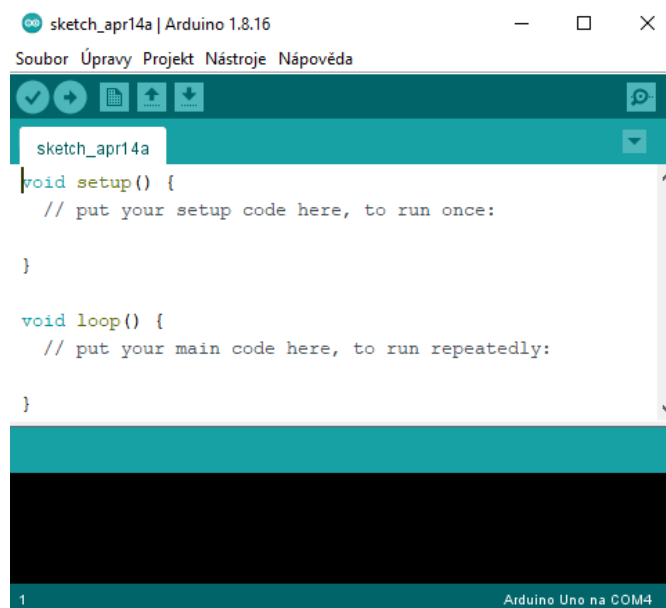


Obr. 38 – Vývojový diagram – Menu5 a Menu6

## 5.2 Arduino IDE

Arduino IDE je vývojové prostředí pro Arduino. Zkratka IDE je z anglického integrated development environment, což znamená integrované vývojové prostředí. Toto vývojové prostředí je napsané v programovacím jazyce Java, proto je dostupné na všech platformách, na kterých je dostupná Java. Z toho plyne, že je dostupné na Windows, Linux i macOS (Kozina, 2015). Pro Windows lze stáhnout buď instalátor, který se o vše postará, nebo komprimovaný ZIP soubor, ze kterého lze vybrat instalační soubor. Z instalačního souboru se nainstaluje samotné prostředí. Pro možnosti stažení na Linux a macOS se stáhne komprimovaný soubor ZIP (Arduino, nedatováno). Syntaxe jazyka, který umožňuje programovat Arduino, je obdobná jako u jazyka C++. Výhodou vývojového prostředí Arduino IDE je dostupnost již hotových

knihoven, které mohou usnadnit tvorbu aplikací (Chiptron, 2021). Pro vytvoření nového projektu stačí zapnout program a hned je vidět základní náhled prostředí. Náhled základní vývojového prostředí je vidět na obrázku č. 39. Po zapnutí se ve vývojovém prostředí se zobrazí dvě hlavní části `setup()` a `loop()`, které jsou stěžejní pro správné vytvoření programu. V části `setup()` se definuje například, chování jednotlivých pinů, zapnutí přenosu pro sériovou linku, nebo inicializace vstupních a výstupních periférií. V části `loop()` je definována činnost programu. Program pro tuto bakalářskou práci byl napsán ve verzi vývojového prostředí Arduino IDE 1.8.16.



Obr. 39 – Vývojové prostředí Arduino IDE

### 5.3 Základní nastavení

Před částmi `setup()` a `loop()` se definují jména pinů, které jsou dále využívány, a použité knihovny. Také lze definovat proměnné, které se budou vztahovat na celý program. V projektu byly použity knihovny pro LCD displej, enkodér a nevolatilní paměť mikropočítače EEPROM (Obr. 40). V knihovnách je zpracován kód pro ovládání jednotlivých hardwarových komponentů, nebo kód pro různé softwarové komponenty. Díky těmto zdrojovým kódům máme pak jednodušší a přehlednější vlastní program, pokud chceme připojit nějaký složitější modul, senzor, displej a další. Na internetu jsou dostupné stovky knihoven.

```
// KNIHOVNY
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // knihovna pro LCD s I2C sběrnici
#include <Encoder.h>           // knihovna pro enkodér
#include <EEPROM.h>            // knihovna pro EEPROM
```

Obr. 40 – Definování knihoven v programu

V další části se definují jména pinů pro tlačítka piny 5 až 9 a pro enkodér piny 2 a 3. Dále jsou definované proměnné, z nichž některé jsou načteny z nevolatilní paměti mikropočítače EEPROM. Jedná se o paměť pro ukládání dat, která si uchová data i po vypnutí napájení. Zkratka EEPROM je z anglického Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. U použitého Arduina Uno je velikost EEPROM paměti 1 kB. Samotný zápis do paměti řídí knihovna EEPROM.h. Na ukládání se používá příkaz EEPROM.write(adresa, hodnota), který je použit v nekonečné smyčce LOOP a na čtení EEPROM.read(adresa). Tímto způsobem lze uložit hodnoty pouze byte tzn. číslo 0 až 255. Pokud chceme uložit větší hodnoty musíme použít příkazy EEPROM.get a EEPROM.put, které byly použity pro uložení vypočtené polohy laboratorního přístroje do proměnné vysledekEEPROM, což je možno použít v případě přerušení práce a vypnutí digitální měřící jednotky.

```
EEPROM.write(0,menu1Citac);  
EEPROM.write(1,menu2Citac);  
EEPROM.write(2,menu3Citac);  
EEPROM.write(3,menu4Citac);  
EEPROM.put(10,vysledek);
```

```
vysledekEEPROM = 0;
```

Obr. 41 – Zapisování do EEPROM

V této části je také definovaná proměnná pro čas stisku tlačítka. Po stisknutí tlačítka totiž nedojde k jednorázovému sepnutí kontaktu, ale k několikanásobnému sepnutí a rozepnutí kontaktu, tedy k mechanickému kmitání. Výsledek je takový, jako kdybychom stiskli tlačítko několikrát rychle za sebou. Tento problém lze řešit úpravou zapojení nebo úpravou programu. V tomto případě byl použit princip programového řešení. Po změně hodnoty signálu po určitou dobu další změny ignorujeme a nereagujeme na ně. Tento čas volíme delší, než je přechodový děj, tedy doba zákmitu tlačítka. Doba zákmitu závisí na mechanickém provedení tlačítka a nejjednodušeji ji určíme experimentálně (Locker, 2014). Čas, po který nebude program reagovat na další stisk tlačítka, byl zvolen na 25 milisekund.

```
unsigned long lastDebounceTime = 0;  
unsigned long debounceDelay = 25;
```

Obr. 42 – DebounceDelay

## 5.4 Funkce setup

Funkce setup() je přípravná a provádí se jen jednou na začátku programu. V části setup() použitého kódu se inicializuje LCD displej, přiřadí se hodnota do proměnné vysledekEEPROM,



což je hodnota polohy laboratorního přístroje uložená v nevolatilní paměti mikropočítače EEPROM a nastaví se vstupní piny tlačítek. Tlačítko je asi nejjednodušší a zároveň nejproblematičtější součástka, se kterou může Arduino pracovat. Nestačí přivést na pin hodnotu jen při stisknutí tlačítka, potřebujeme, aby tam neustále byla jasně definovaná hodnota 1 nebo 0, jinak by došlo k rušení. Výchozí stav se tedy řeší zapojením rezistoru a permanentním přivedením buď stavu 0, nebo 1 na pin, na který je tlačítko připojeno. Těmto dvěma režimům se říká INPUT (pull down) a INPUT\_PULLUP (pull up). Režim INPUT (pull down) vyžaduje externě připojený rezistor mezi vybraný pin a GND, s hodnotou řádově v kΩ. Nepsaným pravidlem je použití hodnoty 10 kΩ. Takto je pin permanentně připojen k zemi přes velký odpor a je na něm tak logická 0, tj. hodnota LOW. Reagovat pak bude na logickou 1. Režim INPUT\_PULLUP (pull up), který byl použit v tomto projektu, je jednodušší, tlačítko se připojí mezi pin a GND. Uvnitř procesoru Arduina se připojí k pinu interní pull-up rezistor, který na pin přivádí přes velký odpor logickou 1. Tento způsob vyhodnocuje logickou 0, čili LOW. (Doškář, nedatováno).

```
void setup() {  
  
    lcd.backlight();  
    lcd.init();  
  
    lcd.clear();  
  
    pinMode(leveTlacitko, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(praveTlacitko, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(nahoruTlacitko, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(doluTlacitko, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(enterTlacitko, INPUT_PULLUP);  
  
    EEPROM.get(10, vysledekEEPROM);  
}
```

Obr. 43 – Setup

## 5.5 Funkce loop

Funkce loop() obsahuje programový kód, který se bude opakovaně provádět v nekonečné smyčce, například čtení vstupů, nastavování výstupů, výpočty, atd. Tato funkce je jádrem všech programů Arduina a vykonává většinu činností. V části loop() použitého kódu se jako první kontrolují stavy pinů enkodéru, jestli se neliší od předchozího stavu. Pokud ano, vypočte se nová hodnota polohy laboratorního přístroje podle daného vzorce, buď pro úhel, nebo pro vzdálenost, a zobrazí se na LCD displej. Vzorce pro výpočet polohy laboratorního

přístroje a pro úhel laboratorního přístroje jsou na obr. 44. První vzorec na obrázku je pro výpočet polohy a druhý pro výpočet úhlu.

```
if (vzdalUhel == 1) //vypočet délky
{vysledek = ((vzdNaOt/10)/((pocetpulzu*4)/rozliseni)*novaPozice);
}
if (vzdalUhel == 2) //vypočet úhlu
{vysledek = (360/((pocetpulzu*4)/rozliseni)*novaPozice);
```

Obr. 44 – Vzorce pro výpočet polohy a úhlu

- výsledek – úhel nebo poloha laboratorního přístroje, která se zobrazí na LCD displej,
- vzdNaOt/10 – posun laboratorního přístroje za jednu otáčku dělený 10 z důvodu jednoduššího nastavování tlačítkem v celých číslech,
- rozliseni – rozlišení enkodéru může být 1x,2x, nebo 4x,
- pocetpulzu – počet pulzů použitého enkodéru na jednu otáčku,
- novaPozice – proměnná načtená z enkodéru.

V další části se kontroluje stav stisku tlačítka nulování. Pokud bylo tlačítko nulování stisknuté, vynuluje se pozice enkodéru pomocí příkazu readAndReset() a vynuluje se i vypočítaná hodnota polohy laboratorního přístroje a nulová poloha se zobrazí se na LCD displeji.

Následuje část, která řeší zobrazení nabídky na LCD displeji. Tato část bude podrobněji popsána v uživatelském manuálu Digitální měřicí jednotky. Ve zbylé části funkce loop() se nachází program, který pomocí tlačítek určuje způsob použití Digitální měřicí jednotky, jako je, zda se bude měřit úhel, nebo změna polohy laboratorního přístroje. Nastavuje se zde rozlišení, počet pulzů použitého enkodéru a v případě měření polohy laboratorního přístroje i posun za jednu otáčku závitu. V programu se čte stisknutí tlačítka příkazem digitalRead() a je ošetřeno neplatné stisknutí pomocí lastDebounceTime.

```
{
lastDebounceTime = millis();
}

if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay)

{
```

Obr. 45 – Ošetření neplatného stisknutí

Pro nastavování potřebných veličin (úhel – délka, rozlišení, vzdálenost za jedno otočení laboratorního přístroje, počet pulzů enkodéru) a ukládání dat do nevolatilní paměti mikropočítače EEPROM bylo použito 5 tlačítek MENU+, MENU-, +, - a ENTER. Podrobné listování v menu a podmenu pomocí tlačítek bude opět popsáno v uživatelském manuálu Digitální měřicí jednotky. Tlačítka MENU+ a MENU – lze listovat v 6 menu, možnost dostat se listováním za MENU6 nebo do MENU0 je programově ošetřena viz obr. 46.

```
if (vyberMenu < 0)
{
vyberMenu = 5;
}
```

Obr. 46 – Přejít z MENU0 na MENU5

V MENU3 (vzdálenost za jednu otáčku laboratorního přístroje) a v MENU4 (počet pulzů použitého enkodéru za jednu otáčku) je programově nastaveno tak, že po pátém stisku tlačítka + nebo - se přírůstek hodnoty každým dalším zmáčknutím zvětší, nebo zmenší o pět viz obr. 47.

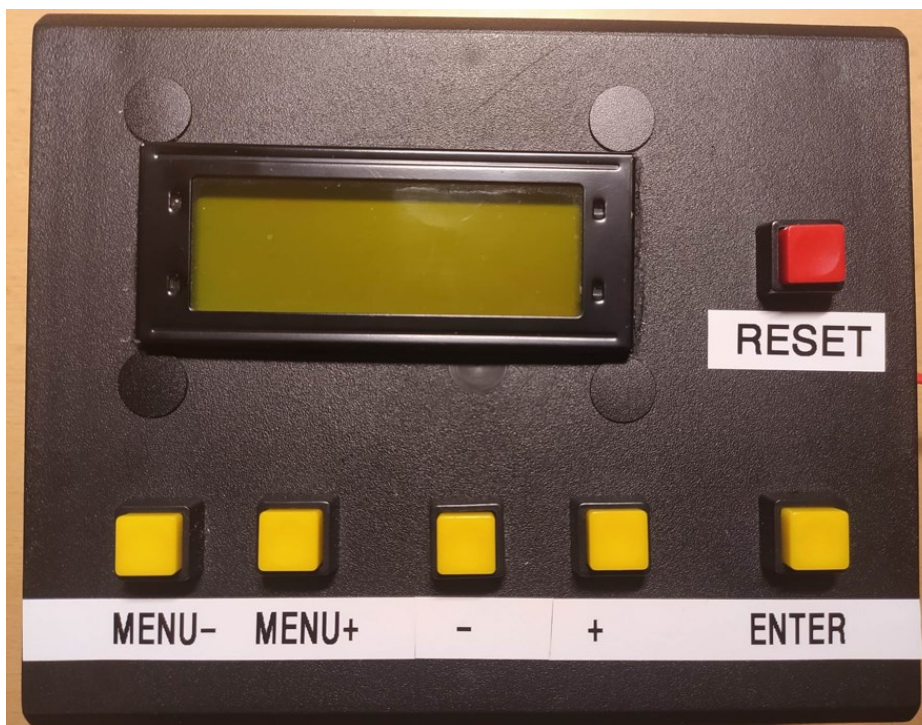
```
if (citacDolu > 5)
{
menu3Citac = menu3Citac - 4;
}

if (menu3Citac < 0)
{
menu3Citac = 0;
}
```

Obr. 47 – Po pěti zmáčknutích tlačítka – se hodnota bude zmenšovat o pět

## 6 Uživatelský manuál

K obsluze digitální měřicí jednotky slouží šest tlačítek, z toho pět tlačítek se používá pro listování v menu a podmenu a šesté tlačítko slouží k restartování měřicí jednotky. Tlačítka jsou pojmenovaná MENU +, MENU -, +, -, ENTER a RESET.

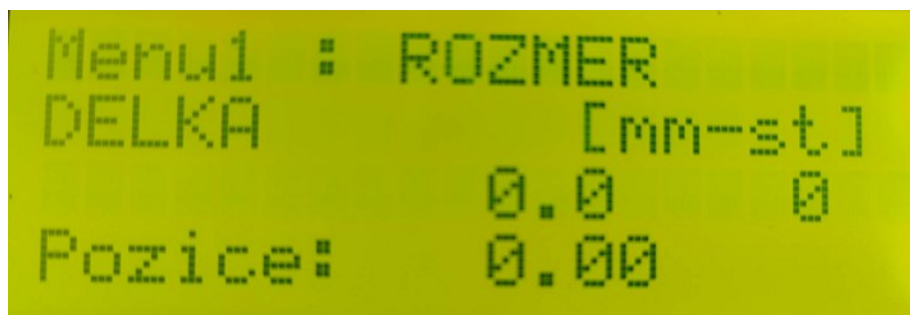


Obr. 48 – Ovládání měřicí jednotky

Tlačítka MENU + a MENU - slouží k listování v jednotlivých menu měřicí jednotky. Těchto menu je celkem šest a to:

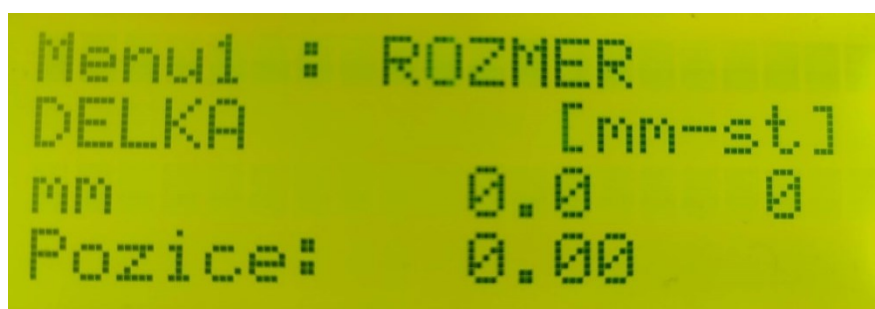
- Menu1 : ROZMER – ve kterém je možnost volby mezi měřením vzdálenosti a úhlu,
- Menu2 : Rozlišení – kde je možnost nastavit rozlišení enkodéru,
- Menu3 : mm/otacka – kde se nastavuje vzdálenost na jednu otáčku hřídele enkodéru,
- Menu4 : Pocet pulzu – kde je možnost volby počtu pulzů na otáčku enkodéru,
- Menu5 : Nulovani – po potvrzení tohoto výběru se vynuluje pozice enkodéru,
- Menu6 : Do EEPROM – toto menu slouží pro uložení nastavení ostatních menu do EEPROM a také pro uložení naměřené hodnoty do EEPROM.

Tlačítka + a - slouží pro listování v podmenu, tlačítko ENTER na potvrzení výběru a tlačítko RESET je pro resetování. Po zapnutí se na displeji přístroje objeví tento obr. 49.



Obr. 49 – Displej měřící jednotky po zapnutí

Na prvním řádku displeje je název zvoleného menu. Po zapnutí měřící jednotky to vždy bude Menu1. Na druhém řádku je výběr podmenu pro Menu1. Na výběr je buď DELKA, nebo UHEL. Podmenu DELKA je pro měření vzdálenosti a podmenu UHEL pro měření úhlu. Po zapnutí se objeví podmenu Menu1, které je uložené v paměti EEPROM. V tomto případě je v EEPROM uložené podmenu DELKA, pokud tedy chceme měřit vzdálenost, stačí zmáčknout tlačítko ENTER. Pokud se rozhodneme měřit úhel, tak pomocí tlačítek + a - vybereme podmenu UHEL a pro potvrzení stiskneme tlačítko ENTER. Na třetím řádku se zobrazují vybrané a tlačítkem ENTER potvrzené vlastnosti. Po zapnutí je však prázdný, protože ještě nebyla žádná vlastnost potvrzena. Na čtvrtém řádku se zobrazuje naměřená vzdálenost nebo úhel. Po potvrzení podmenu DELKA se na třetím řádku displeje objeví mm jako značka pro měření vzdálenosti (obr. 50). Pokud bude potvrzeno podmenu UHEL, jako značka se objeví symbol pro stupeň (obr. 51).



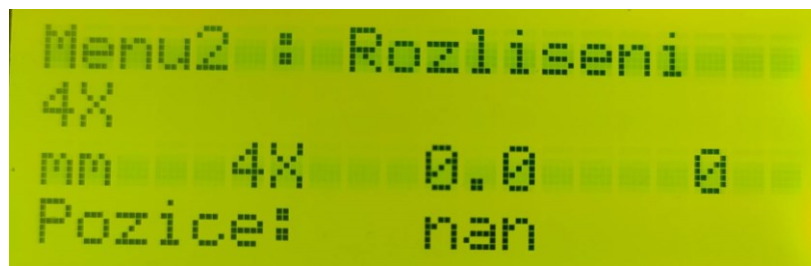
Obr. 50 – Displej Menu1 s potvrzeným výběrem pro měření vzdálenosti



Obr. 51 – Displej Menu1 s potvrzeným výběrem pro měření úhlu

Mezi jednotlivými menu měřící jednotky se dá listovat pomocí tlačítek MENU + a MENU -. Tlačítko MENU + vždy posune ve výběru menu o jedno menu dál MENU – naopak ve výběru menu o jedno ubere. Pokud na posledním menu tedy na Menu6 zmáčkne tlačítko MENU + v nabídce se přemístíme na Menu1. Obdobně to funguje i při zmáčknutí tlačítka MENU - na prvním menu, nabídka se přemístí na poslední menu.

Dále je potřeba potvrdit rozlišení v Menu2. Pomocí tlačítek MENU + a MENU - navolíme Menu2, kde můžeme buď potvrdit rozlišení uložené v EEPROM, které se zobrazuje na druhém řádku, nebo zde vybereme pomocí tlačítek + a – rozlišení enkodéru, které chceme použít a tlačítkem ENTER potvrdíme. Na výběr je z rozlišení 1X, 2X a 4X. Po potvrzení vybraného rozlišení se zobrazí značka 1X, 2X nebo 4X vpravo od značky pro měření vzdálenosti nebo úhlu (obr. 52).



Obr. 52 – Displej Menu2 s potvrzeným výběrem rozlišení 4X

Pokud měříme vzdálenost, je potřeba vybrat vzdálenost, kterou enkodér urazí za otáčku. Tato vlastnost se při měření úhlu nenastavuje. Vzdálenost v milimetrech se nastavuje v Menu3. Opět můžeme potvrdit hodnotu, která je uložena v EEPROM, nebo zvolit novou hodnotu. V EEPROM je uložena hodnota 0,7 mm z důvodu, že o takovou vzdálenost se posune laboratorní přístroj, který byl určen na otestování měřící jednotky. Pokud chceme jinou hodnotu na otáčku enkodéru, použijeme tlačítka +, -. Při prvních pěti zmáčknutích se hodnota mění o desetinu milimetru, při dalších zmáčknutích se hodnota mění o 0,5 mm. Po potvrzení vybrané hodnoty tlačítkem ENTER se na třetím řádku vpravo od zvoleného rozlišení objeví zvolená hodnota, viz obr. 53.

```

Menu3 : mm/otacka
0.7      [mm/ot]
mm      4X      0.7      0
Pozice:      nan

```

Obr. 53 – Displej Menu3 s vybranou vzdáleností 0,7 mm na otáčku enkodéru

V dalším menu tedy v Menu4 se může zvolit počet pulzů, které má použitý enkodér na jednu otáčku. V EEPROM je uložena hodnota 15, protože tolik pulzů má enkodér, který byl použitý v měřící jednotce. Enkodér se k jednotce připojuje pomocí kabelu s konektorem RJ11, proto se k měřící jednotce může připojit prakticky libovolný enkodér zapojený do zásuvky RJ11. Pokud tedy použijeme enkodér, který byl zvolen v této práci, tak stačí potvrdit výběr počtu pulzů tlačítkem ENTER. Pokud se použije jiný enkodér, s jiným počtem pulzů na otáčku, tak se použijí tlačítka + a -. Při prvních pěti zmáčknutích tlačítka + se hodnota zvětší o jedna, při dalších zmáčknutích se zvětšuje o pět. Obdobně funguje i tlačítko -, s tím rozdílem, že se hodnota nejprve zmenšuje o jedna a po pěti stisknutích se začne zmenšovat o pět. Zvolená hodnota se opět objeví na třetím řádku úplně vpravo (obr. 54).

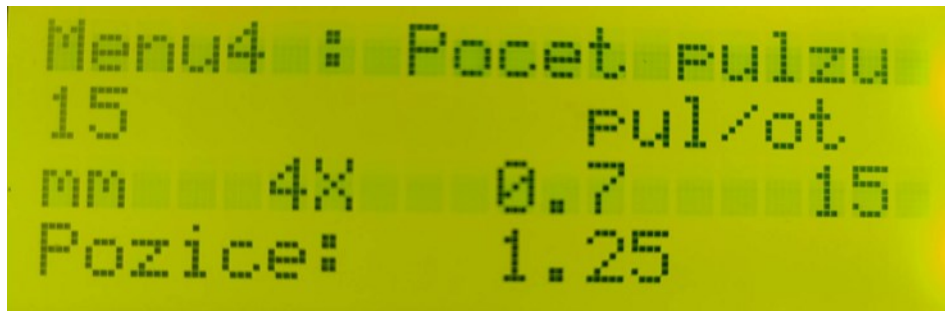
```

Menu4 : Pocet pulzu
15      Pul/ot
mm      4X      0.7      15
Pozice:      nan

```

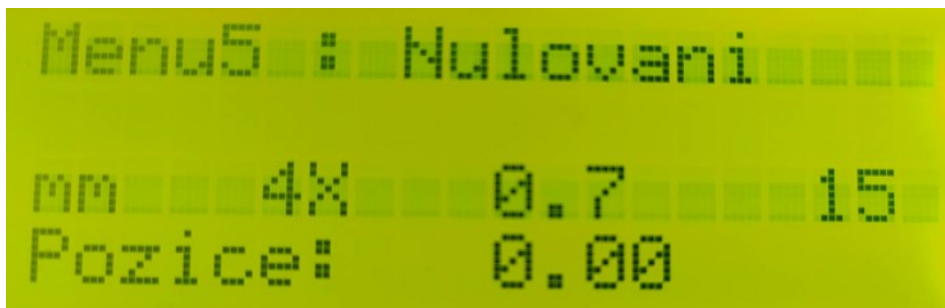
Obr. 54 – Displej Menu3 s vybraným počtem 15 pulzů na otáčku enkodéru

Po zvolení těchto vlastností se může začít měřit. Měřit se může vzdálenost a úhel jak do kladných, tak i do záporných hodnot. Naměřená hodnota se zobrazuje na čtvrtém řádku displeje, viz Obr. 55.



Obr. 55 – Na čtvrtém řádku se zobrazuje naměřená hodnota v tomto případě 1,25 mm

Menu5 slouží pro nulování naměřené hodnoty. Toto menu nemá žádné podmenu, stačí tedy pomocí tlačítek MENU + a MENU – zvolit na Menu5, zmáčknout tlačítko ENTER a naměřená hodnota se vynuluje (obr. 56).



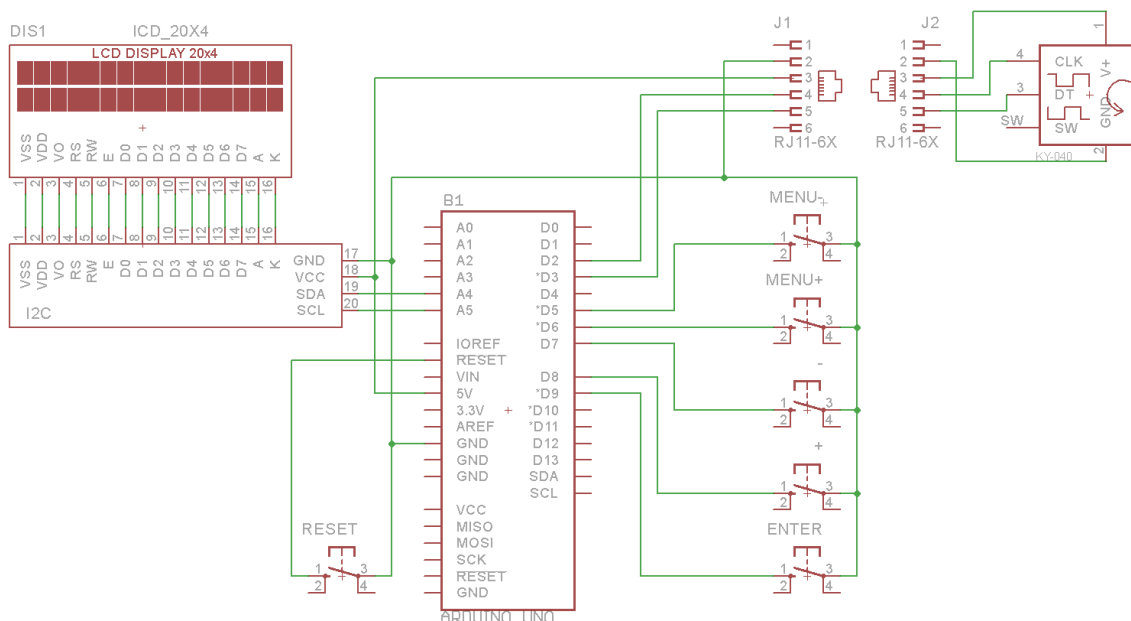
Obr. 56 – Displej Menu5 s vynulovanou hodnou na čtvrtém řádku

Poslední menu tedy Menu6 slouží k uložení nastavení měřící jednotky a naměřené hodnoty do EEPROM. Zmáčknutím tlačítka ENTER se uloží aktuální nastavení a naměřená hodnota do paměti EEPROM. Tlačítko RESET se použije, pokud je potřeba restartovat měřící jednotku. Po restartu se objeví stejný displej jako po zapnutí měřící jednotky a pro další měření je nutné buď potvrdit vlastnosti uložené v EEPROM, nebo vybrat a potvrdit nové.



## 7 Konstrukce

### 7.1 Schéma zapojení měřící jednotky



Obr. 57 – Schéma zapojení měřící jednotky

### 7.2 Připojení enkodéru

Připojení enkodéru k měřící jednotce bylo provedeno pomocí telefonního kabelu s konektorem RJ11. Černý a červený drátek v kabelu jsou napájecí. Červený drát je pro napájecí napětí 5 V a černý pro GND. Zelený drátek je pro připojení pinu CLK enkodéru tedy kanálu A a žlutý drátek je pro připojení pinu DT enkodéru tedy pro připojení kanálu B.

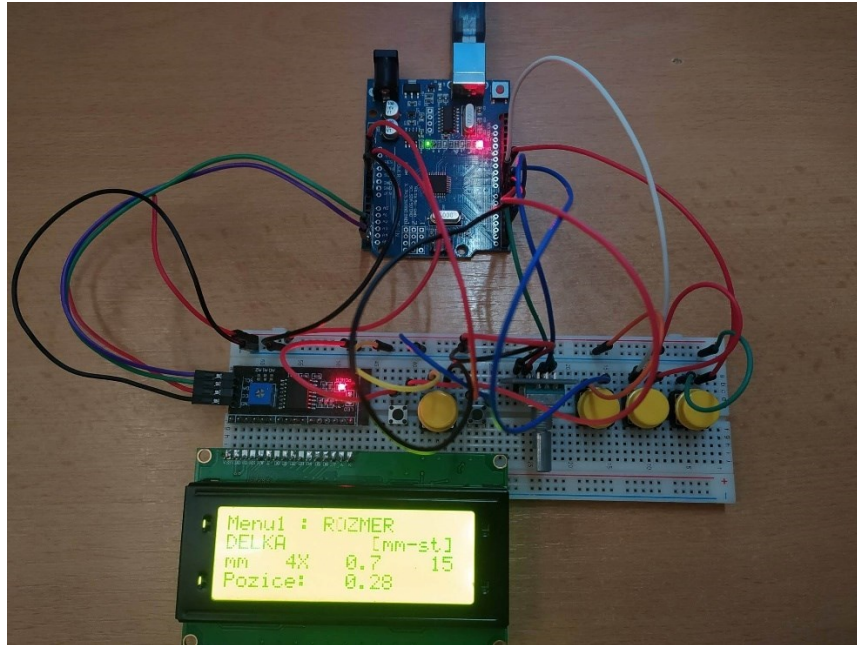


Obr. 58 – Konektor RJ11

### 7.3 Testovací zapojení

Pro účely testování a úpravy programu bylo zapojení obvodu dle navrženého schématu nejprve realizováno na nepájivém poli. Obrovská výhoda nepájivého pole spočívá v tom, že součástky nemusíme fyzicky pájet. Jelikož nejsou v obvodu přidělané napevno, je možno je v

případě potřeby pohodlně odebrat, nebo vyměnit za jiné. Nepájivé pole tvoří plastová izolační deska s otvory o velikosti 2,54 mm, do nichž komponenty vkládáme. Uchycení součástek zajišťují kontaktní hřebíky s pružinkami (Němeček, nedatováno). Na zapojení na obr. 59 byly odladovány chyby, které byly během práce nalezeny.



Obr. 59 – Testovací zapojení

#### 7.4 Přístrojová krabička

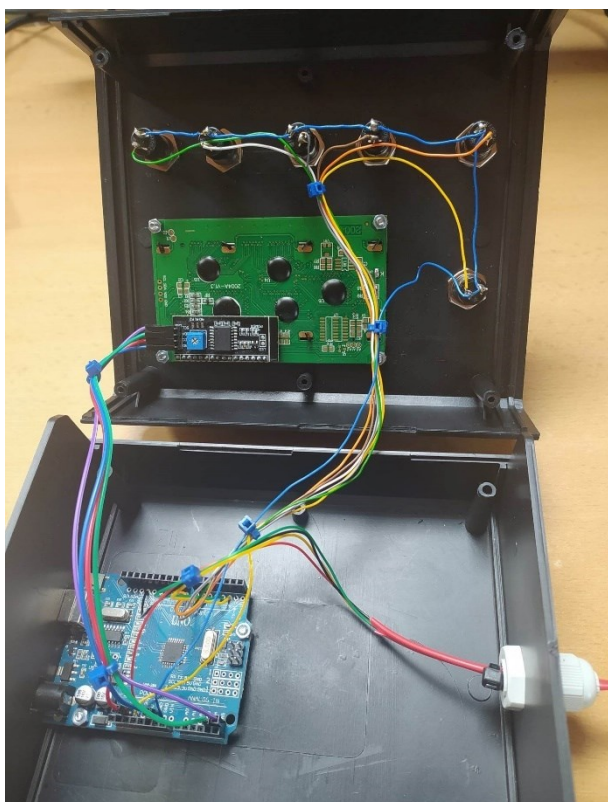
Vreční díl přístrojové krabičky musí být dostatečně velký, jelikož do něho přijde 6 tlačítek a LCD displej. Dostatečné parametry splňuje plastová konstrukce KP9, jejíž rozměry jsou 70x150x179 mm. Další její výhody jsou dostupnost a cena. Konstrukce je tvořena ze dvou „u“ profilů a dále přední a zadní stěnou. Celá konstrukce je spojena pomocí čtyř vrutů společně s plastovými nožičkami typu N01. Přístrojová krabička je vyrobena z materiálu polystyrénu, tento materiál je vhodný pro výrobky s použitím napětí do maximálně 50 V. Například pokud je výrobek napájen pomocí vnějšího síťového adaptéru, nebo je napájen pomocí baterií (GM electronic, nedatováno). Do konstrukce přístrojové krabičky bylo nutno vyvrtat a vyříznout otvory pro tlačítka, LCD displej, USB a napájecí pin z Arduina a vývodku. Výrobní dokumentace pro výrobu otvorů se nachází v příloze bakalářské práce.



Obr. 60 – Krabička typu KP9 (Kradex, nedatováno)

#### 7.4.1 Osazení přístrojové krabičky

Do přístrojové krabičky byly vyvrtány a vyříznuty díry pro tlačítka, LCD displej a Arduino a kabelovou průchodku pro kabel k připojení enkodéru. Poté byla přístrojová krabička těmito součástkami osazena a následně byly jednotlivé součásti propojeny drátky, které k nim byly připájeny.



Obr. 61 – Zapojení uvnitř měřící jednotky

## 7.5 Finální podoba Digitální měřící jednotky

Měřící jednotka má z vrchní strany 5 ovládacích tlačítek, jedno resetovací tlačítko a LCD displej. Na levé straně měřící jednotky se nachází napájecí souosý konektor a USB konektor Arduina. Na pravé straně je kabelová průchodka pro kabel RJ11 k připojení enkodéru.



Obr. 62 – Digitální měřící jednotka vrchní část



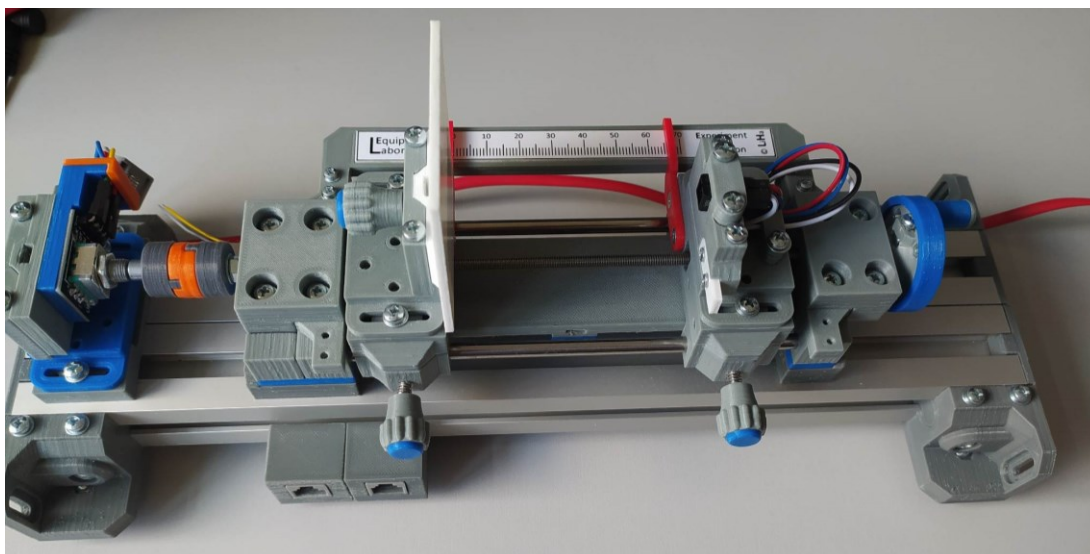
Obr. 63 – Digitální měřící jednotka levý bok



Obr. 64 – Digitální měřící jednotka pravý bok

## 8 Funkční testování Digitální měřící jednotky

Funkční testování Digitální měřící jednotky proběhlo na laboratorním přístroji obr. č. 65. Byly provedeny dva testy.

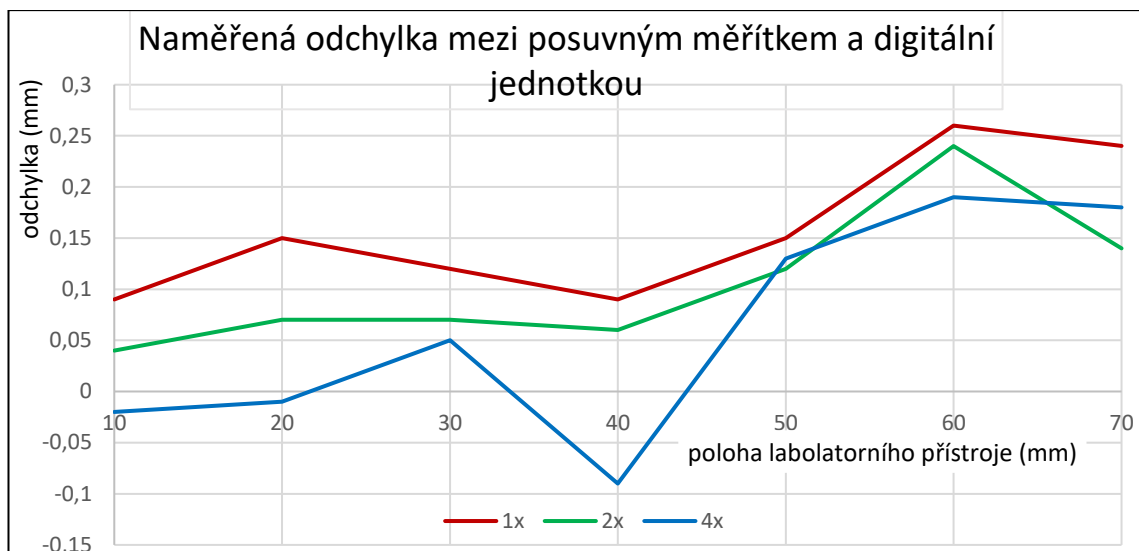


Obr. 65 – Laboratorní přístroj

V prvním testu se posouval laboratorní přístroj vždy o jeden cm, následně byl posun změřen posuvným měřítkem a odečtena hodnota na digitální měřící jednotce. Test byl proveden v každém ze tří rozlišení. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky č. 2 a spočítána odchylka mezi hodnotou naměřenou posuvným měřítkem a digitální jednotkou. Odchylky byly zaneseny do grafu na obrázku č. 66. Měření posuvným měřítkem v tomto případě také není úplně přesné z důvodu konstrukce laboratorního přístroje, který má ukazatele pravitka laboratorního přístroje z plastu. Při přiložení posuvného měřítka se prohne a tím vznikne nepřesnost.

Tab. 2 – Naměřené hodnoty digitální měřící jednotkou

Laboratorní přístroj (mm)	Rozlišení 1x			Rozlišení 2x			Rozlišení 4x		
	Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)	odchylka (mm)	Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)	odchylka (mm)	Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)	odchylka (mm)
10	10,4	10,31	0,09	10,1	10,06	0,04	10,45	10,47	-0,02
20	20,5	20,35	0,15	20,3	20,23	0,07	20,55	20,56	-0,01
30	30,55	30,43	0,12	30,4	30,33	0,07	30,7	30,65	0,05
40	40,55	40,46	0,09	40,4	40,34	0,06	40,6	40,69	-0,09
50	50,5	50,35	0,15	50,4	50,28	0,12	50,75	50,62	0,13
60	60,6	60,34	0,26	60,6	60,36	0,24	60,8	60,61	0,19
70	70,75	70,51	0,24	70,4	70,26	0,14	70,7	70,52	0,18

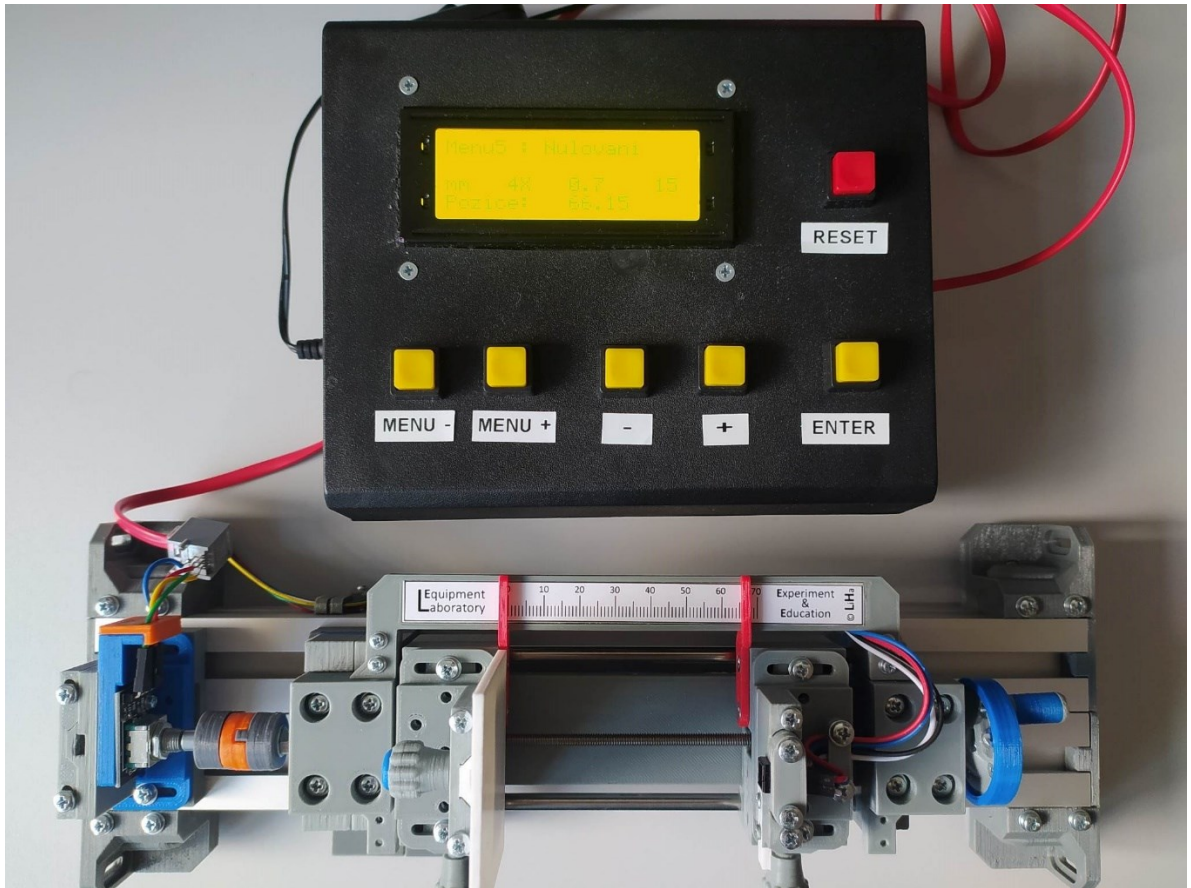


Obr. 66 – Odchylka mezi posuvným měřítkem a digitální jednotkou

V dalším měření bylo 5x přejet z polohy 0 mm do polohy 70 mm a zpět při každém rozlišení enkodéru. Měření bylo provedeno na odzkoušení rozdílů vzdáleností naměřených hodnot digitální jednotkou. Při každém přejetí 70 mm a zpátky k nule by se digitální jednotka měla dostat na hodnotu 0. Rozdíly byly minimální i při posledním přejetí se digitální jednotka dostala téměř do nulové polohy.

Tab. 3 – Naměřené hodnoty digitální měřící jednotkou – opakovatelnost

Rozlišení 1x		Rozlišení 2x		Rozlišení 4x	
Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)	Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)	Posuvné měřítko (mm)	Digitální jednotka (mm)
70,35	70,65	70,4	70,28	70,3	70,54
0	0	0	-0,02	0	0
7,5	70,84	70,5	70,49	70,5	70,89
0	0,05	0	0	0	0,05
70,5	70,56	70,5	70,7	70,5	70,75
0	0,09	0	0,09	0	0,07
70,65	70,75	70,7	70,54	70,75	70,91
0	0,19	0	0,02	0	0,09
70,8	70,6	70,7	70,77	70,9	71,03
0	0,14	0	0,02	0	0,1



Obr. 67 – Digitální měřící jednotka připojená k laboratornímu přístroji

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zkonstruovat digitální měřící jednotku pro měření polohy a úhlu pomocí inkrementálních snímačů.

Jako základní prvek pro měřící jednotku bylo použito Arduino UNO a jako snímač byl použit mechanický inkrementální enkodér EC11, který je umístěn na modulu KY-040. Naměřená hodnota a výběr nastavení parametrů měřící jednotky se zobrazuje na LCD displeji 20x4. K nastavení parametrů digitální jednotky je použito 5 tlačítek. Nastavit se může buď měření polohy, nebo úhlu, rozlišení enkodéru, vzdálenost, kterou laboratorní přístroj urazí za jednu otáčku enkodéru a jaký má enkodér počet pulzů na jednu otáčku. Naměřené hodnoty a nastavení parametrů digitální měřící jednotky se dají uložit do EEPROM paměti.

Cíle bakalářské práce byly splněny, odzkoušení digitální měřící jednotky proběhlo na laboratorním přístroji.

Tab. 4 – Technické parametry

Napájení	12 V, 1 A DC
Možnosti rozlišení	1x, 2x, 4x
Jednotky měření	mm, °
Počet enkodéru pulzů na otáčku	2–255
Posuv na otáčku	0,1mm – 25,5mm



## Literatura

- AKM. *Figure 8a. Optical linear encoder* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.akm.com/us/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/type-mechanism-1/>
- ARDUINO. [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/software>
- CELERA. *Inductive and Capacitive Position Sensors – A Comparison* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.celeramotion.com/zettlex/support/technical-papers/inductive-and-capacitive-position-sensors/>
- COLLINS, Danielle. *FAQ: How do magnetic encoders work?* [online]. 2015 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/faq-how-do-magnetic-encoders-work/>
- COLLINS, Danielle. *How do magnetic linear encoders differ from optical versions?* [online]. 2018 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/how-do-magnetic-linear-encoders-differ-from-optical-versions/>
- COLLINS, Danielle. *What are capacitive encoders and where are they suitable?* [online]. 2015 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-capacitive-encoders-and-where-are-they-suitable/>
- COLLINS, Danielle. *FAQ: What do X1, X2, and X4 position encoding mean for incremental encoders?* [online]. 2015 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-do-x1-x2-and-x4-position-encoding-mean-for-incremental-encoders/>
- ČERNÝ, Michal. *I2C adaptér pro LCD displej – Arduino* [online]. 2015 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://robodoupe.cz/2015/i2c-adapter-pro-lcd-displej/>
- DOŠKÁŘ, Václav. *Lekce 6 - Arduino - Pokročilá práce s tlačítky* Zdroj: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/hardware/arduino-a-prace-s-tlacitky/> [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/hardware/arduino-a-prace-s-tlacitky/>
- ELEKTROLAB. *Kapacitné, Magnetické a optické enkodéry - základné porovnanie technológií* [online]. 2022 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.elektrolab.eu/blog/kapacitne-magneticke-a-opticke-ekodery-zakladne-porovnanie-technologiei>
- FIGIE, Paul. *Rotary Encoders - Taking the Mystery Out of Using Rotary Encoders* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.ezautomation.net/industry-articles/rotary-encoders.htm>

- GMELECTRONIC. *Z2W black (KP09) krabička plastová* [online]. [cit. 2023-04-21].  
Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1507744/z2w-blackkp09-krabicka-plastova>
- HAMBLOG OK1RR. *Levné moduly – rotační enkodér KY-040* [online]. [cit. 2023-04-14].  
Dostupné z: <https://ok1rr.blogspot.com/2020/09/levne-moduly-rotacni-ekoder-ky-040.html>
- HŮLA, Karel. *Softwarové rozšíření přípravku pro měření otáček*. 2021. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- CHIPTRON. *Arduino, čili mikrokontroléry pro každého* [online]. 2021 [cit. 2023-04-14].  
Dostupné z: [https://chiptron.cz/articles.php?article\\_id=275](https://chiptron.cz/articles.php?article_id=275)
- JANOŮŠEK, Petr. 2021. *Rozhraní pro měření a zpracování informace z otáčkového a momentového čidla*. Praha, Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrických pohonů a trakce.
- KIRCHNER, Tomáš. *Výroba a implementace enkodérové jednotky*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- KRADEX. [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: [https://www.kradex.co.cz/product/krabiky\\_s\\_bonimi\\_panely/z2](https://www.kradex.co.cz/product/krabiky_s_bonimi_panely/z2)
- KOZINA, Jakub. *2. díl o Arduinu – typy desek* [online]. 2015 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: [https://phgame.cz/PHGame\\_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/2-dil-o-arduinu-typy-desek/](https://phgame.cz/PHGame_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/2-dil-o-arduinu-typy-desek/)
- KOZINA, Jakub. *4. díl o Arduinu – Shieldy* [online]. 2015 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: [https://phgame.cz/PHGame\\_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/4-dil-o-arduinu-shieldy/](https://phgame.cz/PHGame_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/4-dil-o-arduinu-shieldy/)
- KOZINA, Jakub. *5. díl o Arduinu – Seznamujeme se s deskou UNO* [online]. 2015 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: [https://phgame.cz/PHGame\\_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/5-dil-o-arduinu-seznamujeme-se-s-deskou-uno/](https://phgame.cz/PHGame_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/5-dil-o-arduinu-seznamujeme-se-s-deskou-uno/)
- KOZINA, Jakub. *6. díl o Arduinu – Připojujeme Arduino k PC a instalujeme IDE* [online]. 2015 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: [https://phgame.cz/PHGame\\_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/6-dil-o-arduinu-pripojujeme-arduino-k-pc-a-instalujeme-ide/](https://phgame.cz/PHGame_seriale/serialy/zaciname-s-arduinem/6-dil-o-arduinu-pripojujeme-arduino-k-pc-a-instalujeme-ide/)
- LASKAKIT. *Digitální měřič délky* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/digitalni-meric-delky/#ratingTab>
- LEWOTSKY, Kristin. *How to Select the Right Encoder for Your Motion Axis* [online]. 2019 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.automate.org/industry-insights/how-to-select-the-right-encoder-for-your-motion-axis>
- LOCKER, Martin. *6. Tlačítko podruhé* [online]. 2014 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://robotika.vosrk.cz/guide/arduino/lesson06/cs>

- LOCKER, Martin. *Kvadrurní enkodér* [online]. 2009 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://robotika.gitlab.io/articles/encoder-signal-decoding/cs>
- MALÝ, Martin. *Hradla, volty, jednočipy: Úvod do bastlení*. Praha, 2017, 513 s. ISBN 978-80-88168-26-3.
- MEGATRON. ELEKTROPŮMYSL.CZ. *Co je rotační enkodér?* [online]. 12. 2022 [cit. 2023-04-12]. ISSN 2571-076. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/2022/elektroprumysl-cz-zari-2022>
- MEGATRON. *30 IP67 INOX* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/30-ip67-inox>
- MEGATRON. *Průvodce enkodéry* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/dotaz/pruvodce-enkodery>
- MEGATRON. *QR30-360PI-CK* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/qr30-360pi-ck>
- NĚMEČEK, Dominik. *Lekce 1 - Arduino - Nepájivé pole a desky plošných spojů* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/hardware/nepajive-pole-a-desky-plosnych-spoju-pro-arduino>
- OBDRŽÁLEK, David. *Jak na enkodéry* [online]. 2020 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://robodoupe.cz/2020/jak-na-enkodery-1/#easy-footnote-bottom-2-15138>
- PAŠTYKA, Jan a Ondřej HRUŠKA. *Rotační enkodér* [online]. 2017, 5 s. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: [https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/rotary\\_encoder/Rotary\\_Encoder.pdf](https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/rotary_encoder/Rotary_Encoder.pdf)
- PRIMADILNA. *DRO digitální odměřovací jednotka, 2 osy, Warco* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.primadilna.cz/DRO-digitalni-odmerovaci-jednotka-2-osy-Warco-d3044.htm#detail-anchor-parameters>
- REDAKCE HW SERVERU. *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877* [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sberrnice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- RESEARCHGATE. [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-setup-of-a-linear-encoder-A-read-head-with-xMR-sensor-moves-along-the-x-axis-above\\_fig3\\_326418583](https://www.researchgate.net/figure/The-setup-of-a-linear-encoder-A-read-head-with-xMR-sensor-moves-along-the-x-axis-above_fig3_326418583)
- ROZSÍVAL, Aleš. *Číselné soustavy se základem 10, 2, 8, 16: Kódy: Grayův kód, převod čísla do Grayova kódu* [online]. 2012, 3 s. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z:

- [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.sosboh.cz%2Fsubory\\_texty%2F54\\_9-vy\\_32\\_inovace\\_18-14-rz-doc.doc&wdOrigin=BROUSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.sosboh.cz%2Fsubory_texty%2F54_9-vy_32_inovace_18-14-rz-doc.doc&wdOrigin=BROUSELINK)
- SHOBBY. *Přepínač tlačítko čtv. OFF - (ON) 250V/1A žluté* [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.shobby.cz/Prepinac-tlacitko-ctv-OFF-ON-250V-1A-zlute-d2528.htm#detail-anchor-description>
- SCHMACHTL. *Absolutní enkodéry* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.schmachtl.cz/senzorika-absolutni-ekodery>
- SVOBODA, Aleš. *Vše o napájení Arduina* [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: [https://navody.dratek.cz/technikuv-blog/napajeni-arduina.html?gclid=Cj0KCQjw06OTBhC\\_ARIsAAU1yOWLfBcwG3Q402Lm0Ijja4BTy9W1h8k--OCqZzDZng34oF9ulQ4HTD0aAozMEALw\\_wcB](https://navody.dratek.cz/technikuv-blog/napajeni-arduina.html?gclid=Cj0KCQjw06OTBhC_ARIsAAU1yOWLfBcwG3Q402Lm0Ijja4BTy9W1h8k--OCqZzDZng34oF9ulQ4HTD0aAozMEALw_wcB)
- STORE.ARDUINO. *Arduino Uno Rev3* [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- VACEK, Jáchym. *Kódování dat* [online]. 23 s. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: [https://vyuka.hradebni.cz/file.php/53/Cislicova\\_tehnika\\_Kodovani\\_dat.pdf](https://vyuka.hradebni.cz/file.php/53/Cislicova_tehnika_Kodovani_dat.pdf)
- VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. 2015, 240 s. ISBN 978-80-87106-90-7.
- VOJÁČEK, Antonín. *Princip optických enkodérů polohy pro řízení motorů* [online]. 2006 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006022801>
- VOJÁČEK, Antonín. *Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip* [online]. 2007 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- VOJÁČEK, Antonín. *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu* [online]. 2017 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>
- YOUNGBLOOD, Tim. *How to Use a Rotary Encoder in an MCU-Based Project* [online]. 2015 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/projects/how-to-use-a-rotary-encoder-in-a-mcu-based-project/>
- ZAVAVOV. *I2C (TWI) – sériová komunikace po dvou vodičích s adresací* [online]. [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.zavavov.cz/cz/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/68-i2c-twi-seriova-komunikace-po-dvou-vodicich-s-adresaci/>

# **PŘÍLOHY**

A – CD

B – Výrobní dokumentace

**Příloha k bakalářské práci**

Digitální měřicí jednotka

Dominik Jand'ourek

**CD**

## **OBSAH**

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Obslužný program zařízení

**Příloha k bakalářské práci**

Digitální měřicí jednotka

Dominik Jand'ourek

**Výrobní dokumentace**



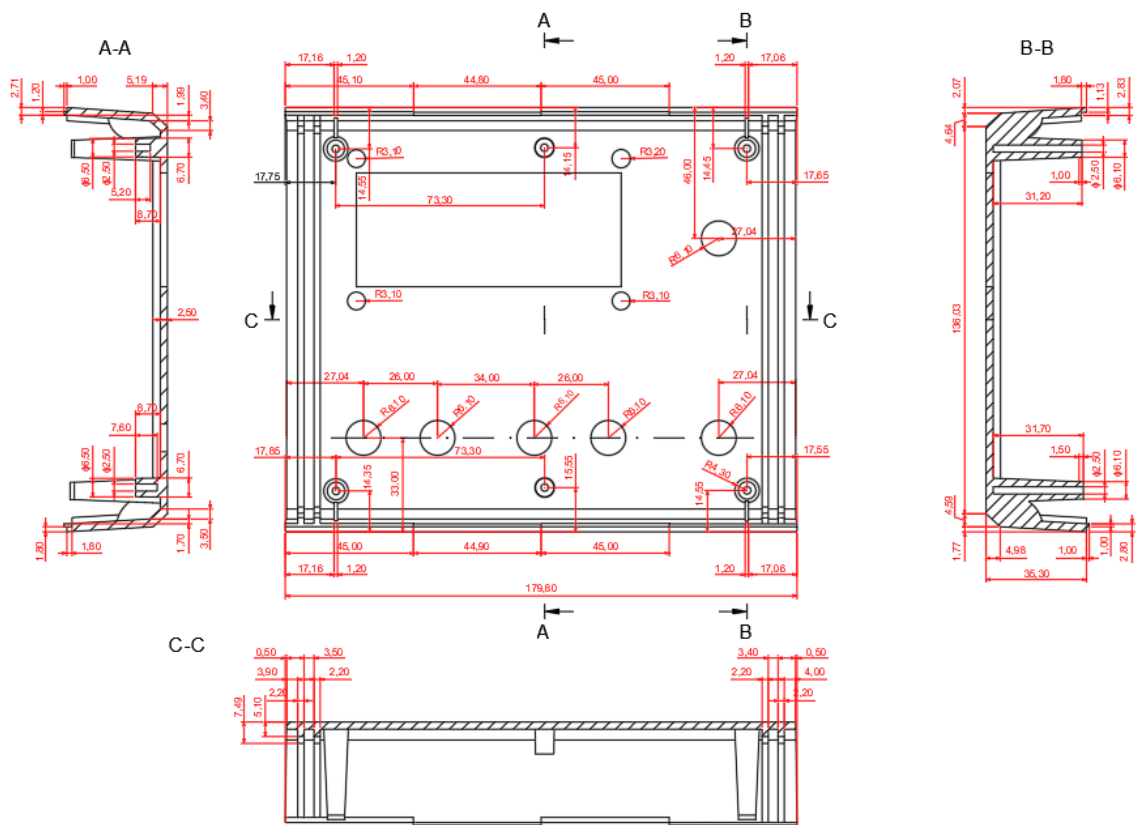
## Obsah

Seznam obrázků .....	B-1
Technické výkresy .....	B-2
3D model.....	B-9

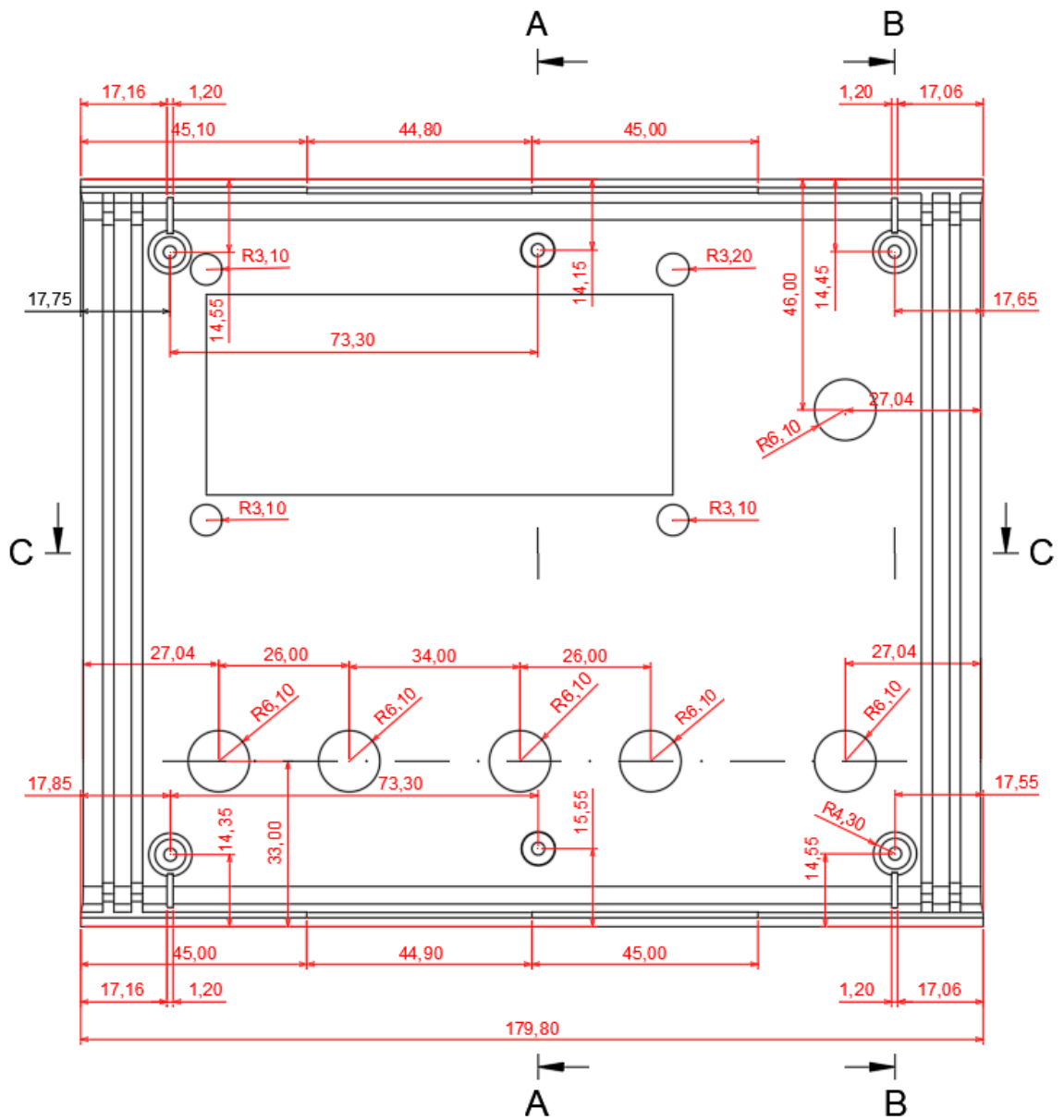
## Seznam obrázků

Obr. 1 – Vrchní díl.....	B-2
Obr. 2 – Vrchní díl bez řezů .....	B-3
Obr. 3 – Vrchní díl řez A a B.....	B-4
Obr. 4 – Vrchní díl řez C .....	B-4
Obr. 5 – Pravý díl.....	B-5
Obr. 6 – Levý díl.....	B-5
Obr. 7 – Spodní díl.....	B-6
Obr. 8 – Spodní díl bez řezů .....	B-7
Obr 9 – Spodní díl řez A a B .....	B-8
Obr. 10 – Spodní díl řez C .....	B-8
Obr. 11 – 3D model měřicí jednotky .....	B-9

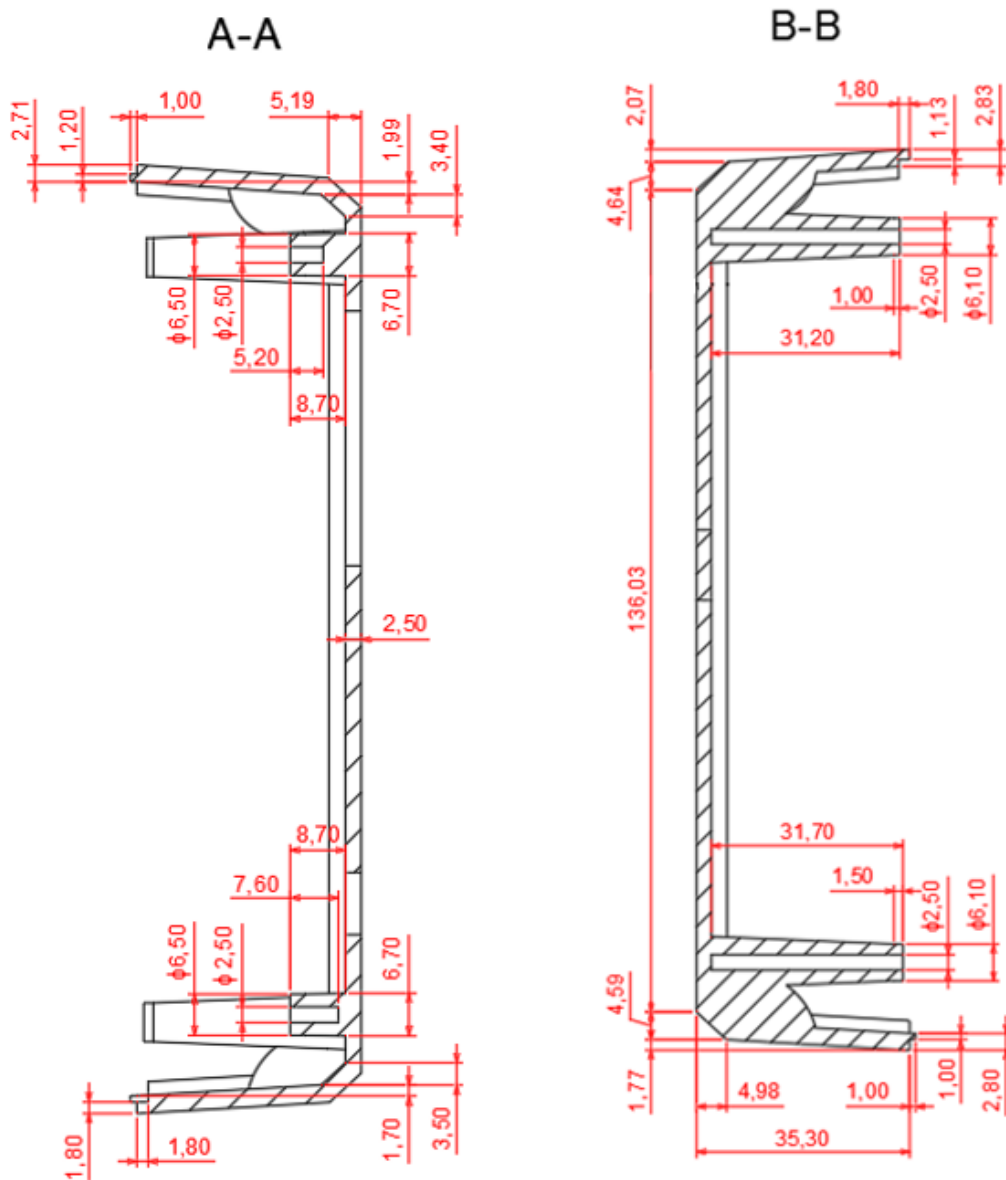
# Technické výkresy



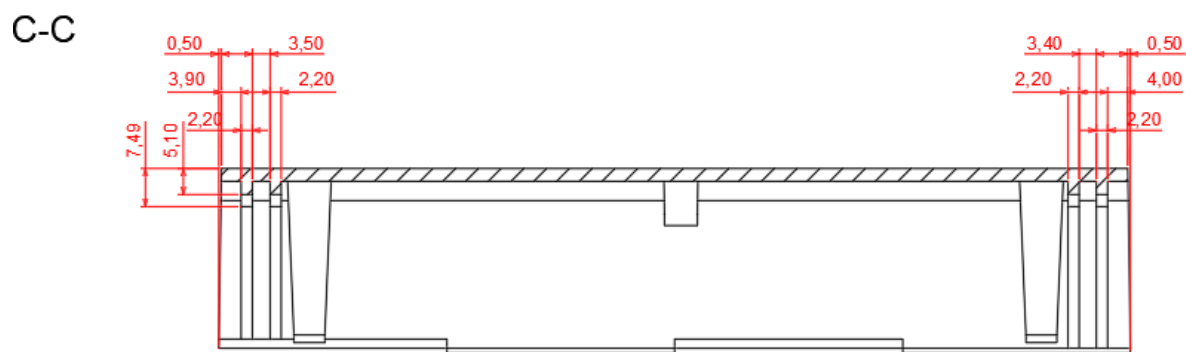
Obr. 1 – Vrchní díl



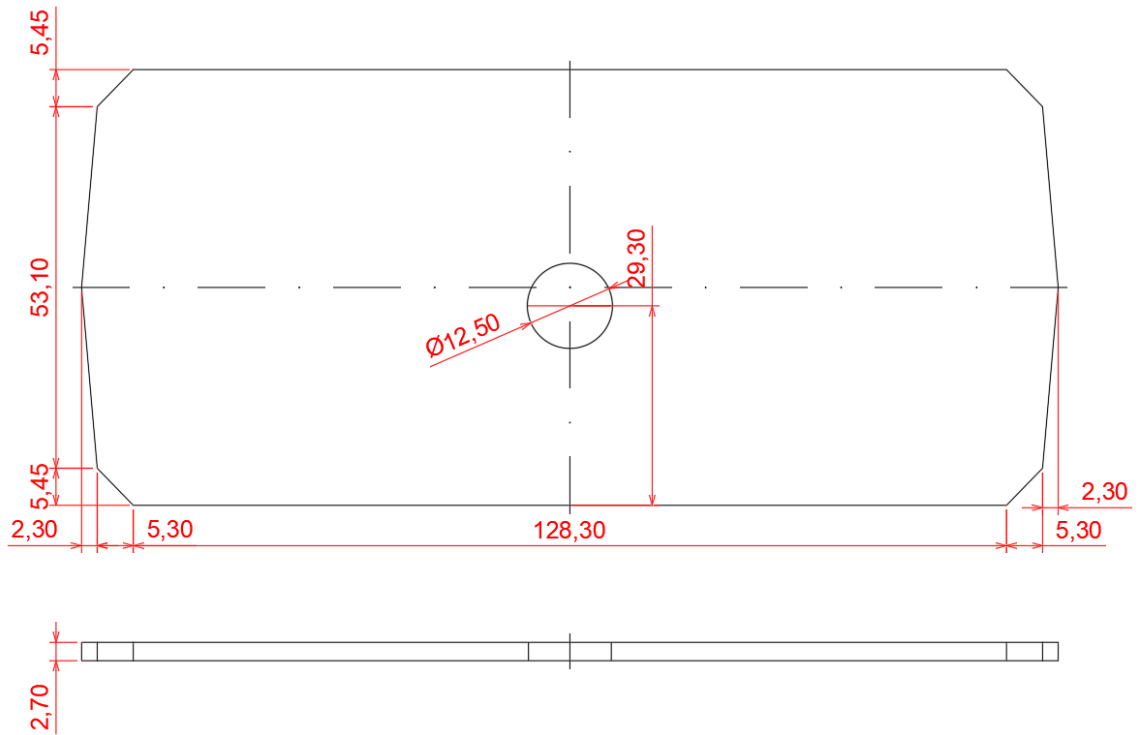
Obr. 2 – Vrchní díl bez řezů



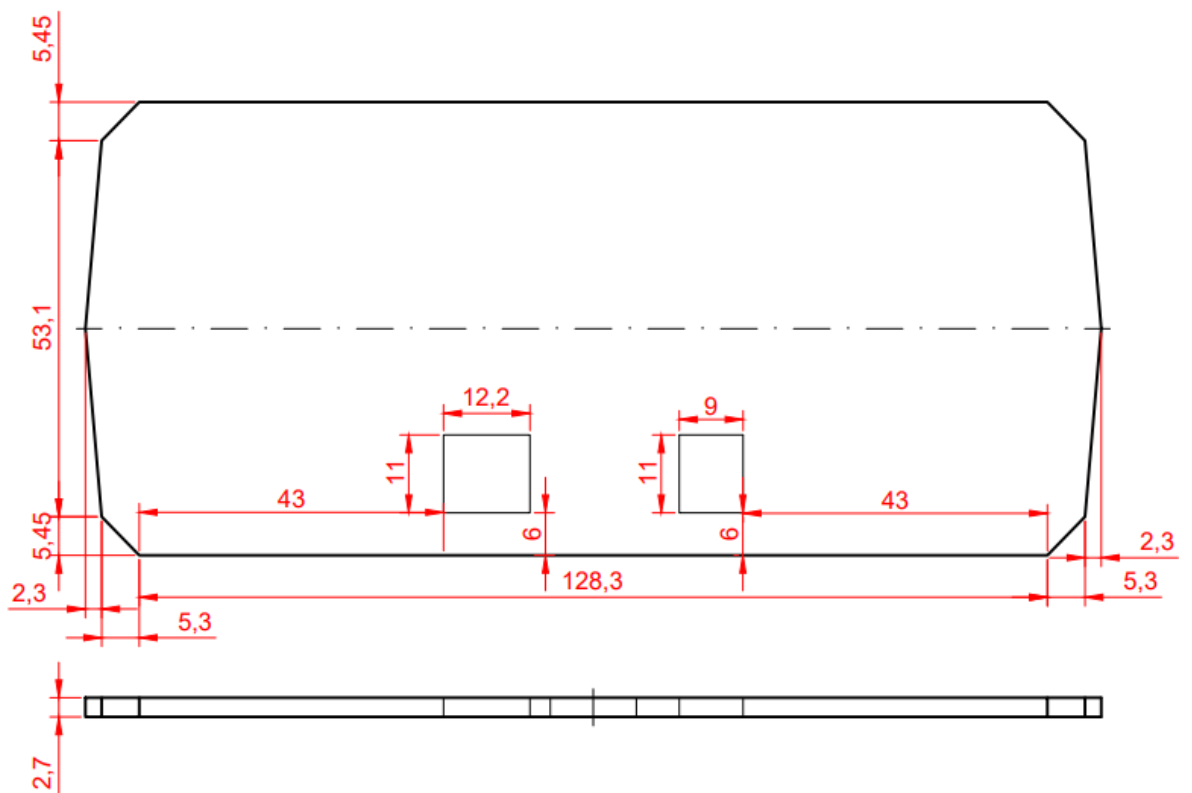
Obr. 3 – Vrchní díl řez A a B



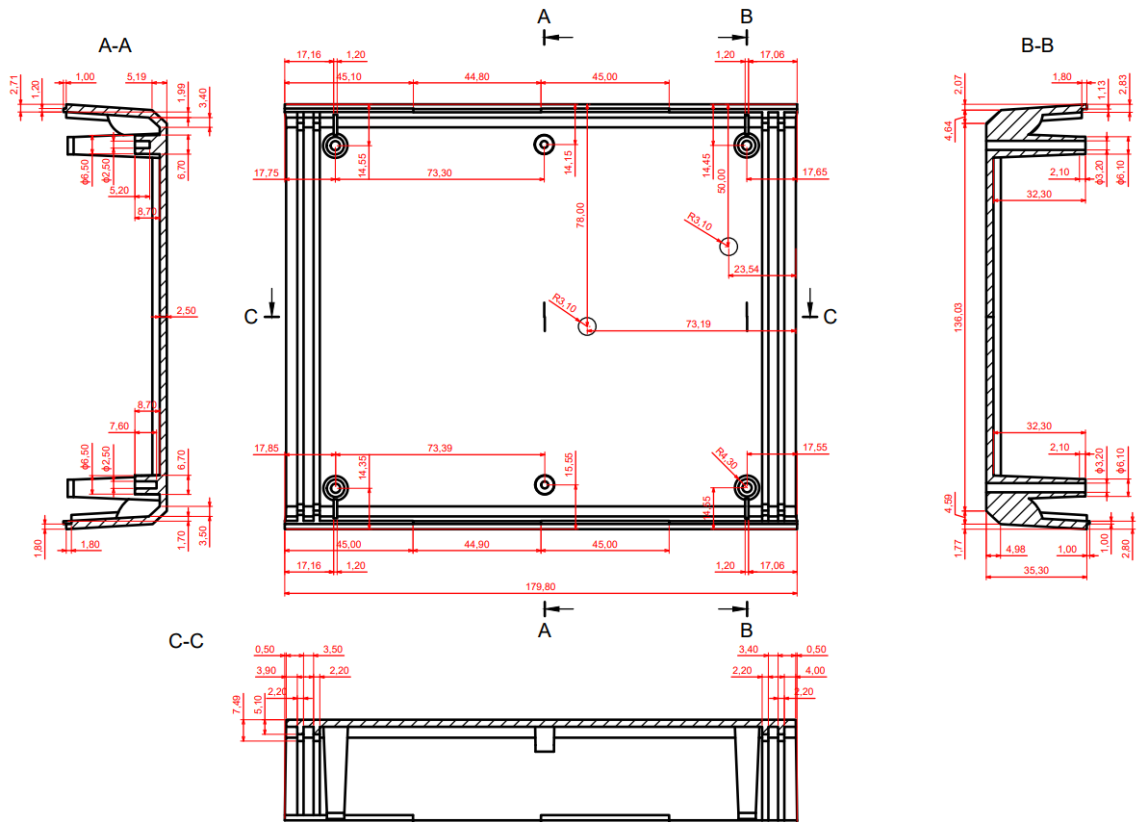
Obr. 4 – Vrchní díl řez C



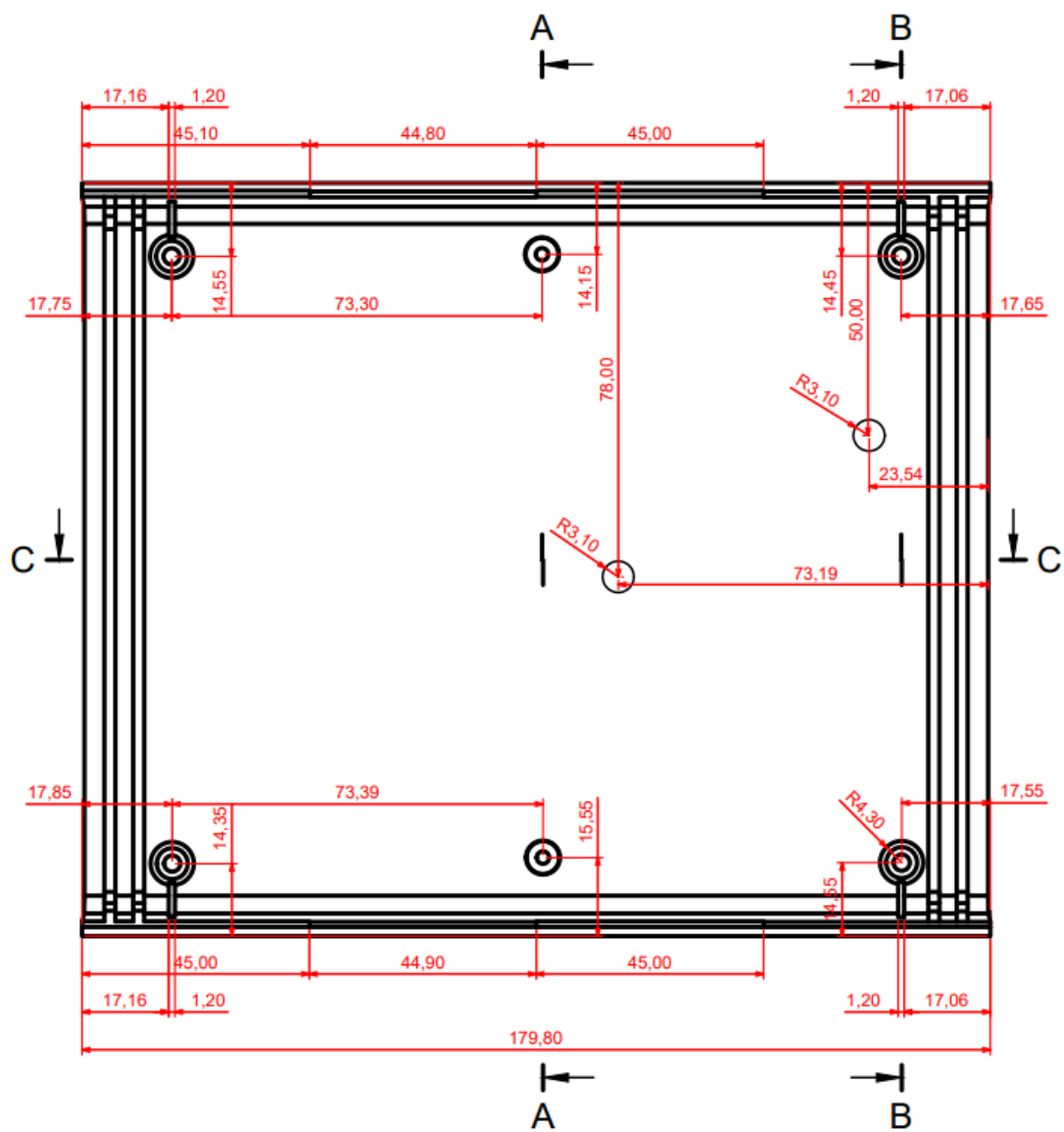
Obr. 5 – Pravý díl



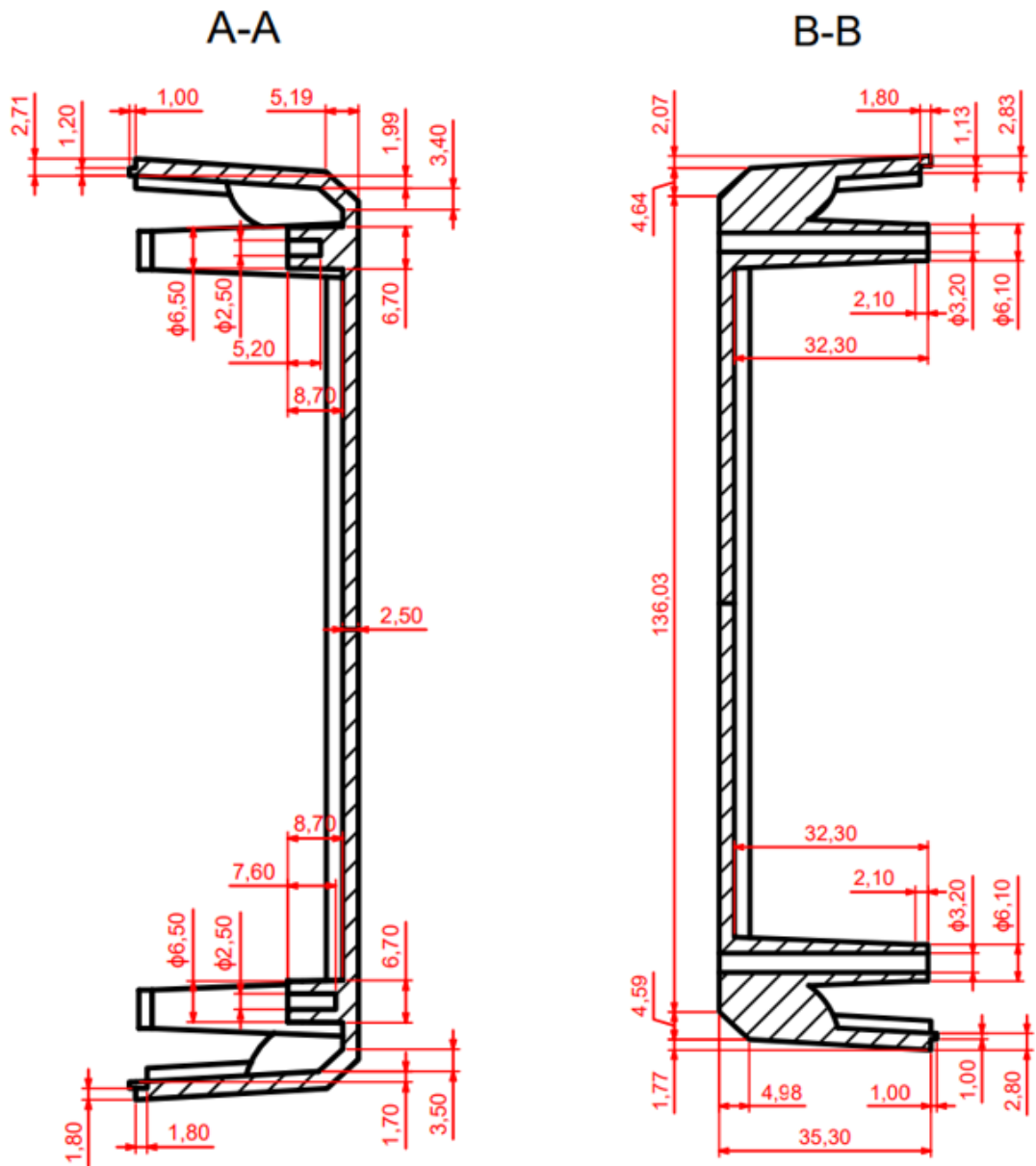
Obr. 6 – Levý díl



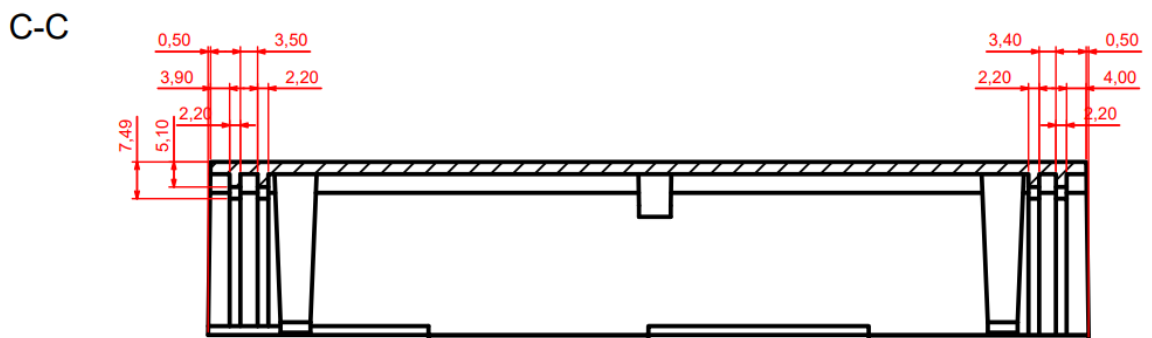
Obr. 7 – Spodní díl



Obr. 8 – Spodní díl bez řezů



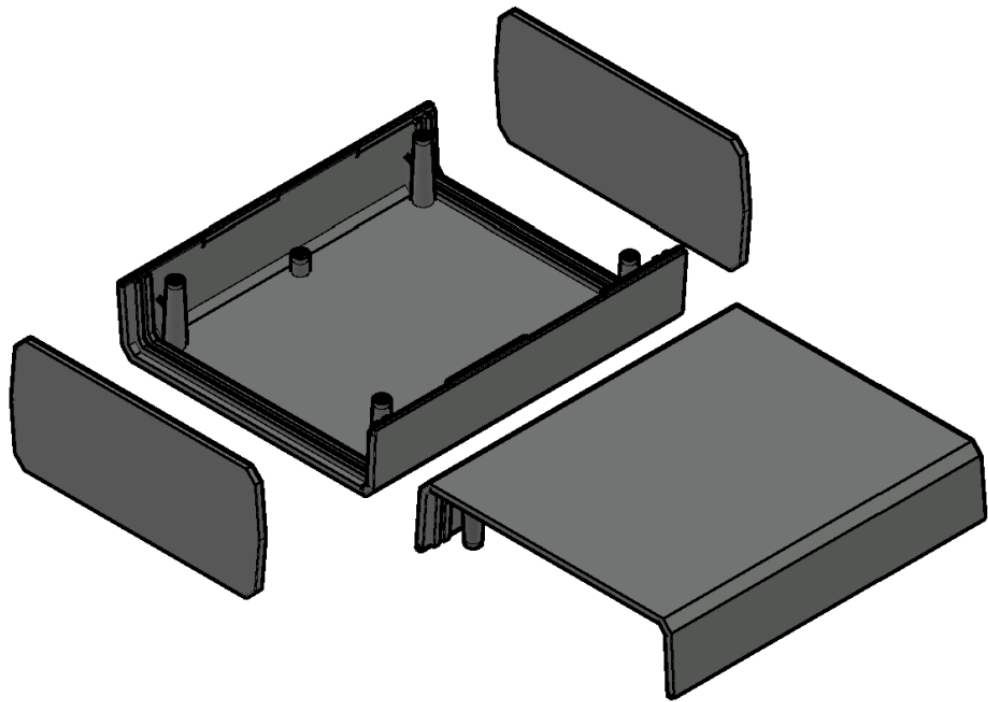
Obr 9 – Spodní díl řez A a B



Obr. 10 – Spodní díl řez C



## 3D model



Obr. 11 – 3D model měřící jednotky