

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Elektronický plyn pro motorovou zkušebnu

Luboš Rybák

Bakalářská práce
2020

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Luboš Rybák
Osobní číslo:	D16190
Studijní program:	B3709 Dopravní technologie a spoje
Studijní obor:	Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě
Téma práce:	Elektronický plyn pro motorovou zkušebnu
Zadávací katedra:	Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Zásady pro vypracování

Navrhněte řídicí elektroniku pro ovládání elektronického plynu pro nastavování polohy lankem ovládané škrtící klapky motocyklu. Elektronický plyn se bude používat na dynamometrickém stanovišti pro ladění řídicí jednotky motoru motocyklu. Již existují komponenty, které při realizaci využijete: krokový motor vč. mechanického držáku, s převodem a řemenicí pro uchycení lanka plynu (kompletní akční člen), driver pro krokový motor, napájecí zdroj. Úkolem je doplnit tuto sestavu o řídicí elektroniku a ovládací interface.

Doporučený postup:

1. Seznamte se stávajícím stavem zařízení (s existujícími komponenty).
2. Navrhněte elektroniku řídicí části.
3. Vytvořte firmware pro řídicí část.
4. Ověřte funkci zařízení.

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

Seznam doporučené literatury:

1. HEROUT, Pavel. Učebnice jazyka C. 4., přeprac. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 271, viii s. ISBN 8072322206. 2. WILLIAMS, Elliot. AVR programming: Learning to Write Software for Hardware. Sebastopol, Calif.: Maker Media, 2014. Make.magazine.com. ISBN 1449355781. 3. PLÍVA, Zdeněk. EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2010, 184 s. ISBN 9788073002527. 4. Podklady poskytnuté vedoucím práce. 5. Datasheety výrobců komponent.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **5. listopadu 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2020**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 21. dubna 2020

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 27. 7. 2020

Luboš Rybák

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D., za vstřícný přístup a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce.

ANOTACE

Tato práce se zabývá návrhem řídicí elektroniky pro ovládání elektronického plynu pro nastavování polohy lankem, kterým se bude ovládat škrticí klapka motocyklu pomocí krokového motoru. První část je věnována teorii, kde jsou stručně popsány principy a rozdělení krokových motorů a také seznámení se s Arduino platformou. Další část se zabývá praktickou stránkou, kde jsou popsány jednotlivé použité komponenty, propojení mezi nimi a návrh hardwaru a softwaru pro tuto práci. Poslední část je zasvěcena testování výsledného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

krokový motor, arduino, motocykl, elektronický plyn

TITLE

Electronic throttle for dynamometer stand

ANNOTATION

The bachelor thesis deals with proposal for control electronics for control electronic gas for setting a position by throttle cable which will be control butterfly valve of motorcycle by stepping motor. The first part is devoted to theory where principles and divisions of stepping motors are shortly described and also familiarization with Arduino platform. The next part deals with the practical side where each used components, interconnection between them and proposal of hardware and software for this bachelor thesis are described. The last part is dedicated to testing the resulting device.

KEYWORDS

stepper motor, arduino, motorcycle, electronic throttle

OBSAH

OBSAH	7
ÚVOD	10
POŽADAVKY NA SYSTÉM ELEKTRONICKÉHO PLYNU	11
1 KROKOVÝ MOTOR	12
1.1 ROZDĚLENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	13
1.1.1 Aktivní krokové motory	13
1.1.2 Pasivní krokové motory	13
1.1.3 Hybridní krokové motory	13
1.1.4 Lineární krokové motory	14
1.2 ZPŮSOBY USPOŘÁDÁNÍ VINUTÍ	15
1.2.1 Unipolární	15
1.2.2 Bipolární	16
1.3 ZPŮSOBY ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	16
1.3.1 Řízení s celým krokem	16
1.3.1.1 Jednofázové řízení	17
1.3.1.2 Dvoufázové řízení	17
1.3.2 Řízení s polovičním krokem	18
1.3.3 Mikrokování	20
1.4 ZPŮSOBY NAPÁJENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	21
1.4.1 Napájení jmenovitým napětím	21
1.4.2 Napájení proudem jmenovité hodnoty	21
1.4.2.1 Omezení proudu předřadným rezistorem	22
1.4.2.2 Dvouhadinové řízení proudu	22
1.4.2.3 Pulsní řízení proudu	23
2 ARDUINO PLATFORMA	24
2.1 MOTIVACE	24
2.2 POPIS ARDUINA	24
2.2.1 Hardware	24
2.2.1.1 Typy desek	25
2.2.2 Software	25
3 NÁVRH SYSTÉMU ELEKTRONICKÉHO PLYNU	26
3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA NÁVRHU SYSTÉMU ELEKTRONICKÉHO PLYNU	26
3.2 POPIS SYSTÉMU	27
3.3 OVLÁDÁNÍ SYSTÉMU	29

3.4	SHRnutí VÝZNAMU LED DIOD	30
3.5	SIGNALIZACE CHYB	32
3.6	POUŽITÉ KOMPONENTY.....	33
3.6.1	<i>Krokový motor</i>	33
3.6.2	<i>Driver krokového motoru</i>	35
3.6.3	<i>Ventilátor</i>	37
3.6.4	<i>Arduino Mega 2560</i>	38
3.6.4.1	Odběr proudu z pinů Arduina	38
3.6.5	<i>Zdroj 5 V DC</i>	39
3.6.5.1	Výpočet výkonu, příkonu a výkonové ztráty snižujícího měniče 24 V DC / 5 V DC s LM2596	39
3.6.6	<i>Zdroj 24 V DC</i>	42
3.6.6.1	Teoretický výpočet příkonu na napěťové úrovni 24 V DC	43
3.7	TEORETICKÝ PŘÍKON CELÉHO ZAŘÍZENÍ.....	44
4	SCHÉMA ZAPOJENÍ	45
4.1	PŘIPOJENÍ KROKOVÉHO MOTORU K ZÁKLADOVÉ STANICI	45
4.2	ZÁKLADOVÁ DESKA	47
4.2.1	<i>Napájení</i>	47
4.2.2	<i>Připojení ovladačů</i>	48
4.2.3	<i>Připojení driveru krokového motoru</i>	50
4.2.4	<i>Připojení mikrospínačů</i>	51
4.2.5	<i>Připojení rádiového modulu pro bezdrátové ovladače</i>	51
4.2.6	<i>Připojení bluetooth modulu pro bezdrátové spojení s PC</i>	52
4.2.7	<i>Připojení LED diod umístěných na základové stanici</i>	53
4.2.8	<i>Připojení ventilátoru</i>	54
4.3	OVLADAČ.....	54
4.4	POUŽITÉ OCHRANY V ZAŘÍZENÍ	55
4.4.1	<i>Jištění zařízení</i>	55
4.4.2	<i>Ochrana vstupů Arduino desky</i>	55
4.4.2.1	Transil PESDV0L1UA.....	56
4.4.2.2	Sériový ochranný rezistor 6k8 na vstupech MCU.....	56
5	MECHANICKÁ KONSTRUKCE	57
5.1	OVLADAČ.....	57
5.2	ZÁKLADOVÁ STANICE	58
5.2.1	<i>Základová deska</i>	58
5.2.2	<i>Krabice pro základovou stanici</i>	60

6	PROGRAM PRO ARDUINO	62
6.1	FILOSOFIE KÓDU	62
6.2	VYTVOŘENÍ PROJEKTU V ATMEL STUDIU 6.1 S VYUŽITÍM HLAVNÍ KNIHOVNY ARDUINA.....	63
6.3	NAHRÁNÍ KNIHOVEN DO PROSTŘEDÍ	64
6.4	POPIS KÓDU	64
6.4.1	<i>Použité knihovny</i>	<i>64</i>
6.4.2	<i>Začátek kódu</i>	<i>65</i>
6.4.3	<i>Funkce void setup()</i>	<i>65</i>
6.4.4	<i>Přerušení od časovače 16-bit Timer/Counter 1</i>	<i>65</i>
6.4.5	<i>Přerušení od časovače 16-bit Timer/Counter 3</i>	<i>67</i>
6.4.6	<i>Funkce void loop()</i>	<i>70</i>
7	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	71
7.1	MĚŘENÍ MULTIMETREM	71
7.2	ZVLNĚNÍ NAPĚTÍ	72
7.3	FUNKCE KROKOVÁNÍ.....	75
7.4	FUNKCE MECHANICKÝCH ROTAČNÍCH ENKODÉRŮ.....	79
7.5	FUNKCE TVAROVAČE 74HC14	82
7.6	ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU OD ENKODÉRU	83
7.7	OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA	84
7.7.1	<i>Pracovní cyklus krokového motoru 100 %.....</i>	<i>84</i>
7.7.2	<i>Pracovní cyklus krokového motoru 50 %.....</i>	<i>87</i>
7.8	PŘÍKON CELÉHO ZAŘÍZENÍ	89
	ZÁVĚR.....	91
	POUŽITÁ LITERATURA	92
	SEZNAM ZKRATEK	94
	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
	SEZNAM TABULEK	97
	SEZNAM PŘÍLOH	98

ÚVOD

V dnešní době jsou motocykly velmi populární druhem dopravního prostředku, hlavně pro motorové nadšence. Při vývoji motocyklu je třeba správně nastavit řídicí jednotku motoru ve všech jeho pracovních režimech.

Pro tyto účely slouží dynamometrická stanoviště a na základě výsledků měření, na kterých lze ladit řídicí jednotky (nahrávat různé křivky předstihu, programovat vstřikovací mapy) a tím zlepšit nebo optimalizovat chod a výkon motoru. Pro různé jízdní režimy je nutno ovládat plynovou rukojeť motocyklu. A právě tímto se zabývám v tomto projektu, kde pomocí elektronického plynu se bude na zkušebně nastavovat poloha plynového lanka, které ovládá škrtící klapku motocyklu.

Nejdříve budou shrnuty požadavky na navrhované zařízení a poté bude okrajově probrána teorie ohledně krokových motorů jako je jejich rozdělení podle konstrukce, způsoby uspořádání vinutí, jakým způsobem se krokové motory napájí a řídí. Dále bude stručně vysvětleno, co je to Arduino platforma, její výhody a k čemu se využívá v tomto projektu.

V další části se přesuneme na praktickou stránku věci, kde vás nejdříve seznámím se systémem elektronického plynu a jeho ovládání. Dále budou popsány parametry jednotlivých použitých komponentů a jejich zapojení mezi sebou. Do detailu proberu i schéma zapojení všech externích modulů, které jsou v konečném důsledku zapojeny do Arduino desky.

V dalších kapitolách bude popsán postup úprav elektroinstalačních krabic využitých v tomto projektu.

Po popisu mechanických úprav bude následovat popis funkčního kódu nahraného do Arduino desky, díky čemuž celé zařízení pracuje správně.

V poslední kapitole této práce budou ukázány oscilogramy pro ověření funkčnosti celého návrhu systému elektronického plynu. Budou také simulovány dva pracovní cykly pro chod krokového motoru, při kterém se změří oteplení jednotlivých částí systému. Na konci práce se změří spotřeba výkonu celého zařízení a porovná se s vypočtenou.

POŽADAVKY NA SYSTÉM ELEKTRONICKÉHO PLYNU

Zařízení bude sestaveno ze dvou ovladačů a krabice, ve které bude umístěn driver krokového motoru, zdroj 24 V DC a řídicí elektronika. Na ovladači musí být prvek, na základě kterého se bude tahat za plynové lanko motocyklu. Uživatel musí mít možnost ovládat plynové lanko s co největší citlivostí. Musí mít přehled, který ovladač je aktivní a jestli plyn motocyklu je zavřený nebo plně otevřen. Důležitá je také ochranná funkce, aby uživatel mohl na dálku rychle zavřít plyn testovaného motocyklu.

Je třeba počítat s tím, že krabice bude umístěná v jámě u dynamometrického stanoviště a ovládání bude probíhat maximálně v deseti metrové vzdálenosti od motocyklu.

Než jsem systém začal vůbec navrhovat, tak jsem byl seznámen s existujícími komponenty, které se použijí v tomto projektu:

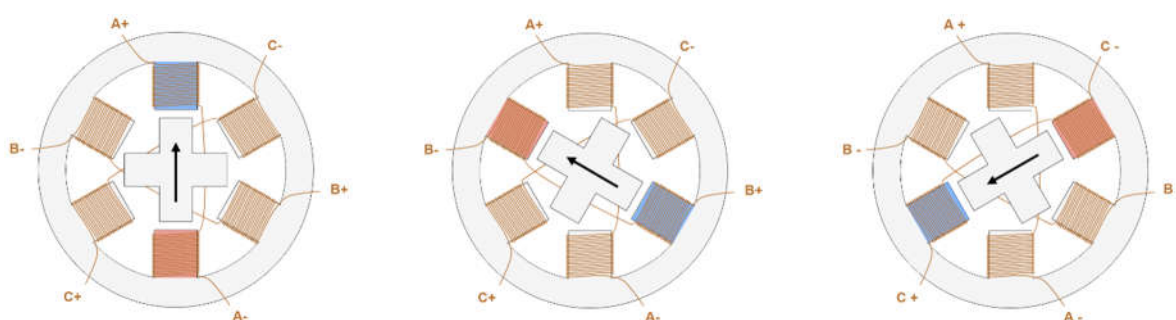
- Krokový motor včetně mechanického držáku a s nastavitelnými dorazy v podobě mikropsínačů.
- Driver krokového motoru.

Mým úkolem je navrhnout systém pro elektronický plyn s využitím existujících komponent a vytvořit firmware pro řídicí elektroniku dle požadavků na systém.

1 KROKOVÝ MOTOR

Krokový motor je bezkomutátorový synchronní motor, který transformuje elektrické impulzy na diskrétní úhlové posuny – tzv. kroky. Úplné otočení hřídele se skládá z určitého počtu kroků, které je dáno konstrukcí motoru a počtem pólových párů na rotoru. Aby se krokový motor dal do pohybu je vždy nezbytné použít řídicí elektroniku pomocí níž můžeme ovládat směr a rychlost otáčení. Výhody těchto motorů jsou jednoduchá řiditelnost a konstrukce, bezúdržbový provoz, obousměrný provoz, mechanická odolnost. Naopak nevýhody krokových motorů jsou vyšší hlučnost, ztráta kroku, která může nastat například při nadměrném zatížení a žádná informace o aktuální poloze motoru. Poslední nevýhodu lze eliminovat připojením enkodéru.

Krokové motory se skládají z rotoru a statoru. Rotor obvykle bývá obyčejný permanentní magnet. Stator je tvořen zuby, na kterých jsou zapojeny cívky. Statorové a rotorové pólové nástavce jsou mezi sebou posunuty a ve chvíli kdy párem cívek protéká proud, vytvoří se magnetické pole. Toto pole donutí rotor k otočení o rozdíl vzdálenosti úhlu mezi pólovými nástavci.



Obrázek 1 Princip krokového motoru [1]

Na obrázku č. 1 je graficky znázorněn princip krokového motoru. Vlevo na obrázku je cívka A napájena a rotor se vyrovná s vytvořeným magnetickým polem. Když je cívka B pod napětím, tak se rotor pootočí o 30° ve směru hodinových ručiček. To samé se bude opakovat, když bude pod napětím cívka C. Barvy zubů statoru znázorňují směr magnetického pole vytvořeného statorovým vinutím. [1]

1.1 Rozdělení krokových motorů

Výkon krokového motoru je dán nejen rychlostí, velikostí kroku a točivým momentem, ale také samotnou konstrukcí, která ovlivňuje způsob řízení krokového motoru. Vnitřní konstrukce motoru se rozlišuje zejména podle konfigurace statoru a rotoru.

1.1.1 Aktivní krokové motory

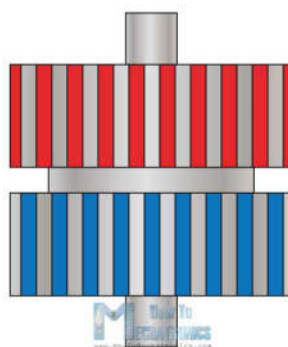
Aktivní krokové motory neboli krokové motory s permanentním magnetem mají rotor tvořený střídajícími se severními a jižními póly po svém obvodu. Vybuzením fáze se rotor pootočí tak, aby dostal své stabilní magnetické polohy. Velikost kroku krokového motoru s permanentním magnetem může být zkrácena zvýšením počtu pólů rotoru nebo zvýšením počtu fází. Předností tohoto typu motoru je dobrý točivý moment. Nevýhoda tohoto řešení je větší velikost kroku a rychlost otáčení oproti ostatním typům motorům.

1.1.2 Pasivní krokové motory

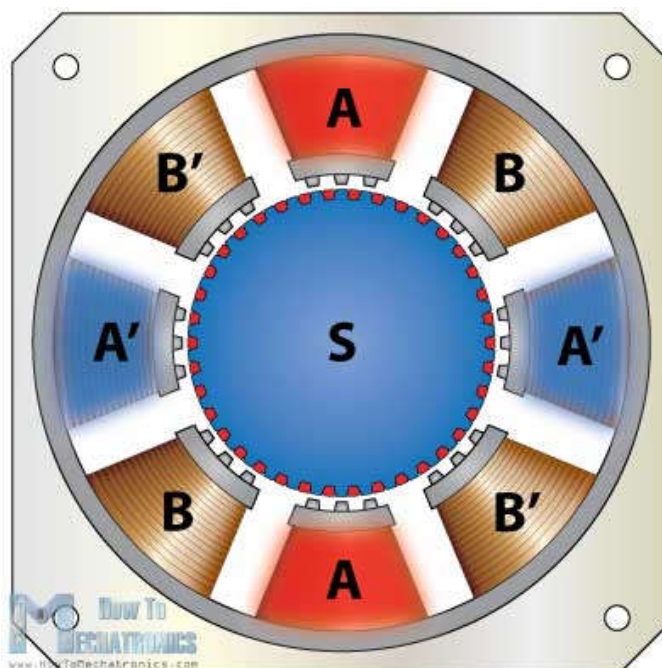
Pasivní krokové motory neboli krokové motory s proměnnou reluktancí mají rotor tvořený vyniklými póly z magneticky měkkého materiálu. Když cívkou statoru protéká proud, rotor se pohybuje tak, aby mezi statorem a zubem rotoru byla co nejmenší vzduchová mezera. Velikost kroku může být zkrácena zvýšením počtu zubů rotoru nebo zvýšením počtu fází. Výhodou pasivních krokových motorů je možnost dosáhnout vyšších rychlostí a malé velikosti kroku. Nevýhodou tohoto typu motoru je nižší točivý moment.

1.1.3 Hybridní krokové motory

Tento druh krokových motorů disponuje výhodami obou předešlých konstrukcí motorů. Je to vysoký moment a malý krok. Díky těmto vlastnostem je tento typ motoru nejpoužívanější. Má ozubený rotor s permanentním magnetem a také ozubený stator. Rotor má dvě sekce, které mají opačnou polaritu a jejich zuby jsou přesazeny, jak je znázorněno na obrázku č. 2.



Obrázek 2 Rotor hybridního krokového motoru [2]



Obrázek 3 Čelní pohled na hybridní krokový motor [2]

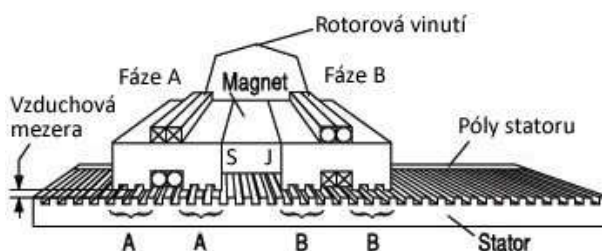
Toto je čelní pohled na hybridní krokový motor, který má 8 pólů na statoru, které jsou tvořeny dvěma vinutími, A a B. Pokud vybudíme vinutí A, zmagnetizujeme 4 póly, z nichž dva budou mít jižní polaritu a dva z nich severní polaritu. Z obrázku č. 3 je vidět, že zuby rotoru jsou vyrovnány se zuby pólů A. V dalším kroku, když bude proud protékat póly B, rotor se začne otáčet proti směru hodinových ručiček a jeho zuby budou zarovnány se zuby pólů B. [2]

Jestliže budeme aktivovat póly v určitém pořadí, rotor se bude pohybovat nepřetržitě. Můžeme také použít různé způsoby řízení, jako je například řízení plným nebo polovičním krokem, mikrokrokování pro ještě menší velikost kroku krokového motoru. [2]

1.1.4 Lineární krokové motory

Stator (primární část) je tvořen feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách. Proti statoru je rotorová (sekundární) část tvořená permanentními magnety, které jsou nalepené na ocelové podložce. Přivedeme-li do primární části (jezdce) řídicí proud, vznikne magnetické pole mezi oběma částmi a dojde k pohybu jezdce. Velikostí proudu pak lze ovládat rychlost pohybu. Rotorová část tvoří ve většině konstrukcí delší část stroje (magnetická dráha), která se dá skládat do určitých délek. O pohyblivé části rozhoduje konstrukční uspořádání. Většina konstrukcí má pohyblivou primární část po dráze tvořené libovolným počtem sekundárních dílů. Sekundární díly se často vyrábí po částech o délkách od 192 do 512 mm. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že k pohybující se části musí být přiveden napájecí kabel, kabel snímače

polohy a také přívod chladicí kapaliny. Vše je umístěno ve vlečném řetězci, který chrání kabely před defekty a zajišťuje plynulý pohyb s jezdcem. Níže na obrázku lze vidět zjednodušené schéma lineárního krokového motoru. [3]



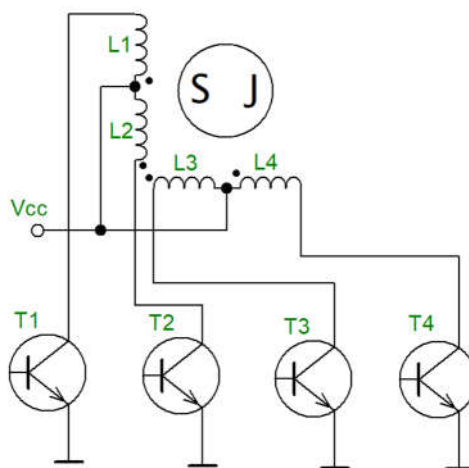
Obrázek 4 Lineární krokový motor [3]

1.2 Způsoby uspořádání vinutí

V předešlých podkapitolách bylo vysvětleno, že cívky musí být napájeny v určitých sekvencích, aby se vytvořilo magnetické pole, se kterým se rotor bude vyrovnávat. Nejdříve budou popsány způsoby uspořádání vinutí cívek motoru a v další kapitole budou rozebrány způsoby řízení krokových motorů. Způsoby uspořádání vinutí lze rozdělit na unipolární a bipolární.

1.2.1 Unipolární

Při tomto způsobu uspořádání cívek existuje jednoduché zapojení řídicího obvodu, které je znázorněno na obrázku č. 5, kde napájecí napětí zapojíme na společný uzel a každou cívku připojíme na tranzistor, který spínáme. Při tomto zapojení proud cívkou teče vždy jedním směrem. Motor má dvě fáze. Každá fáze motoru má dvě cívky, ale v každém okamžiku protéká proud pouze jednou z nich podle požadované polaroty magnetického toku. Spínáním jednotlivých tranzistorů dochází k buzení cívek. Motor při zmíněném buzení má nejmenší krouticí moment a zároveň nejmenší spotřebu proudu.



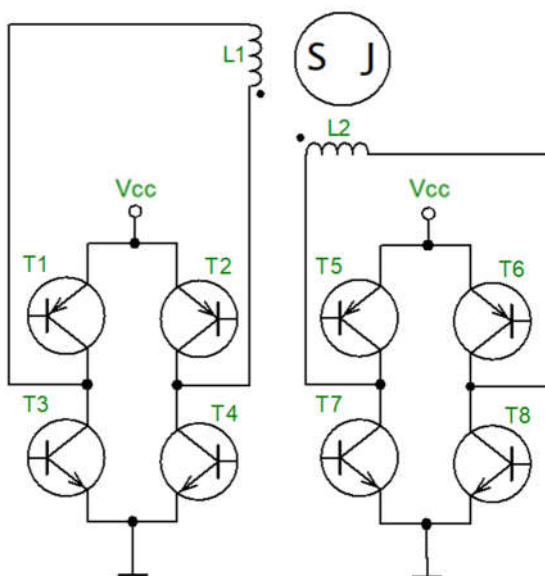
Obrázek 5 Principiální schéma unipolárního uspořádání vinutí

1.2.2 Bipolární

Každou fázi motoru tvoří jedno vinutí. Změna polarity magnetického toku se dosahuje změnou polarity proudu ve vinutí. Abychom dokázali měnit polaritu proudu ve vinutí každé fáze, je potřeba složitější elektrický obvod (dvojitý H-můstek). Počet použitých tranzistorů se vůči unipolárnímu řízení zdvojnásobil.

U bipolárních motorů může být proud vinutím při stejné výkonové ztrátě větší vzhledem k zvětšení efektivního průřezu vinutí a tím zmenšením jeho odporu. (Je potřeba jednoho vinutí místo dvou, obrázek č. 6). Protože moment na hřídeli krokového motoru je přímo úměrný protékajícímu proudu vinutím, tak bipolárním uspořádáním vinutím se dosáhne vyššího momentu.

S technologickým pokrokem jsou výhody unipolárního uspořádání cívek irelevantní, a tak je bipolární uspořádání vinutí nejpoužívanější.



Obrázek 6 Principiální schéma bipolárního uspořádání vinutí

1.3 Způsoby řízení krokových motorů

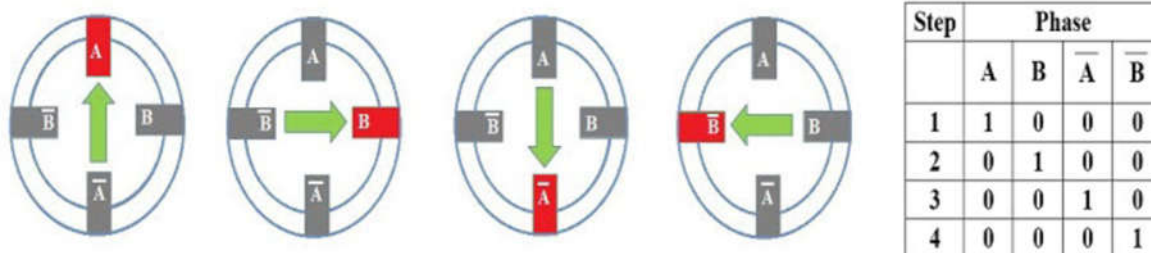
Způsoby řízení krokových motorů dělíme dle velikosti kroku.

1.3.1 Řízení s celým krokem

Velikost jednoho kroku motoru závisí na počtu fází a počtu pólpárů rotoru. Toto řízení se řadí mezi nejjednodušší a má největší velikost kroku.

1.3.1.1 Jednofázové řízení

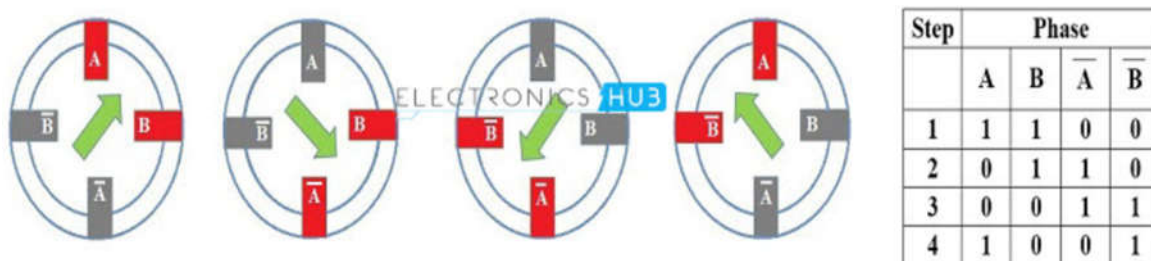
Ve vybraném okamžiku je buzená vždy jen jedna fáze a rotor se otáčí po přesně definovaných krocích tak, aby zuby rotoru vždy byly proti zubům statoru. [4] Níže na obrázku č. 7 vpravo lze vidět tabulku spínacích kombinací pro jednofázové řízení dvoufázového krokového motoru při řízení s celým krokem. V hlavičce tabulky „Step“ znamená krok a „Phase“ znamená fáze.



Obrázek 7 Jednofázové řízení [5]

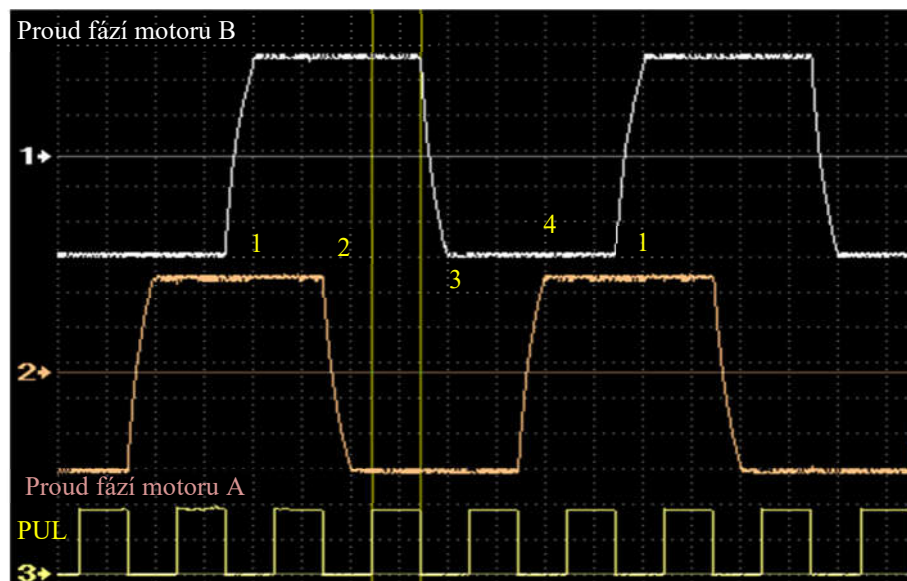
1.3.1.2 Dvoufázové řízení

V jednom okamžiku jsou buzeny dvě fáze krokového motoru. Na obrázku č. 8 je možné si všimnout polohy rotoru v rovnovážném stavu při dvojfázovém buzení. Rovnovážná poloha rotoru není stejná jako u jednofázového řízení, ale je posunuta o poloviční krok. [4] Význam hlavičky tabulky vpravo na obrázku č. 8 je stejný jako na obrázku č. 7 („Step“ = krok, „Phase“ = fáze).



Obrázek 8 Dvoufázové řízení [5]

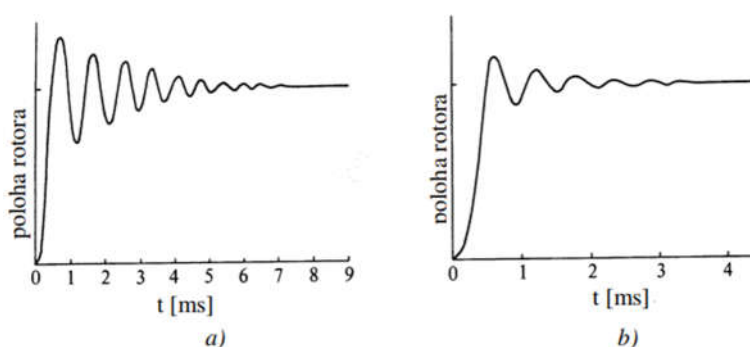
Na obrázku č. 9 je zobrazen oscilogram s průběhy proudu ve fázích motoru při řízení dvoufázového motoru s celým krokem. Průběhy 1 a 2 jsou proudy fázemi motoru a průběh 3 je řídicí pulz o délce 5 ms. Čísla na oscilogramu znamenají číslo kroku „Step“ v tabulce umístěné na obrázku č. 8.



Obrázek 9 Průběhy proudu oběma fázemi motoru při řízení s celým krokem [6]

Velkou výhodou dvoufázového řízení je vyšší moment motoru oproti jednofázovému řízení. Je to způsobeno větším magnetickým tokem v motoru, který vzniká v důsledku buzení dvou vinutí zároveň.

Další velkou výhodou dvojfázového buzení je v tlumení oscilací rotoru při přechodu z jedné rovnovážné polohy do druhé, což je zřetelné z obrázku č. 10. Při oscilaci rotoru se objeví oscilující složka proudu, která se uzavře mezi dvěma vinutími a působí proti změně, která ji vyvolala. Takže vytvoří moment, který působí proti oscilacím rotoru a tím je tlumí. U jednofázového řízení nelze dosáhnout zmiňovaného tlumení, a proto jsou oscilace tlumené pouze mechanickým třením stroje. [4]



Obrázek 10 Oscilace rotoru při přechodu z jedné rovnovážné polohy do druhé při a) jednofázovém řízení a b) dvojfázovém řízení [4]

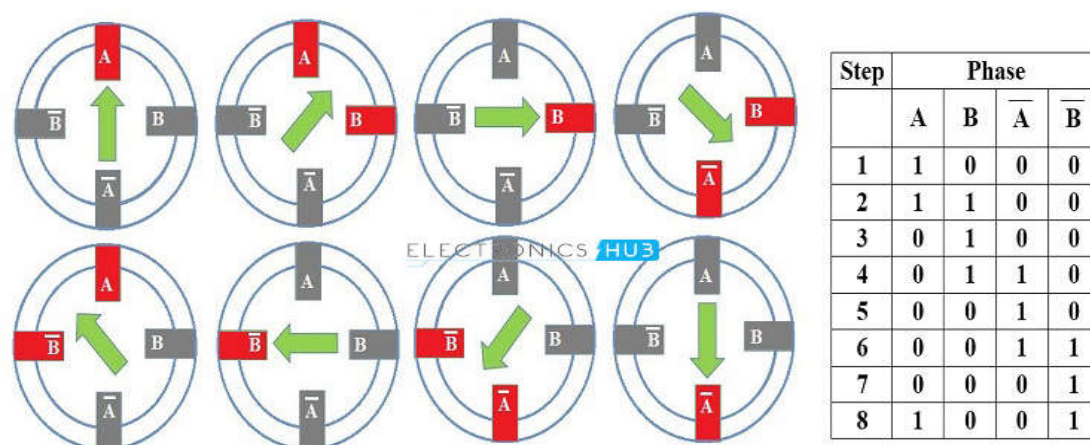
1.3.2 Řízení s polovičním krokem

Je to způsob řízení, který je kombinací jednofázového a dvoufázového buzení. Nejdříve je buzena jedna fáze a následně jsou buzeny dvě fáze v jeden okamžik atd. Takže lze dosáhnout

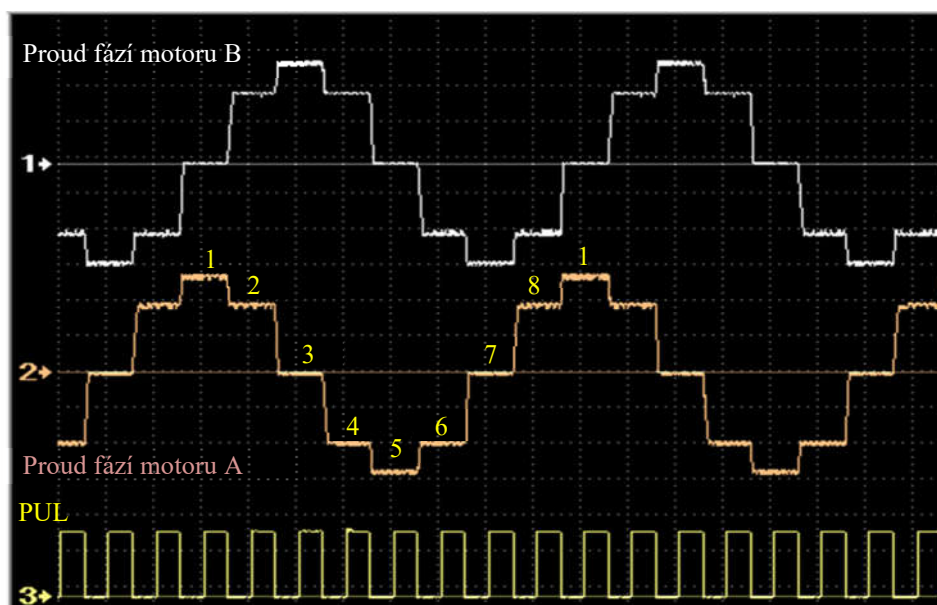
v tomto režimu dvakrát menší velikosti jednoho kroku oproti řízení s celým krokem. Zkrácení kroku pomáhá zabránovat oscilacím rotoru během krokování a tím dosáhnout hladšího chodu motoru.

Při buzení dvou fází v jeden okamžik se docílí maximálního momentu, ale při buzení jen jedné fáze získáme moment nižší (přibližně o 40 %). Z toho plyne, že moment na hřídeli motoru je proměnný, což je nevýhodou tohoto řízení.

Na obrázku č. 12 je oscilogram, který koresponduje s tabulkou umístěnou vpravo na obrázku č. 11. Čísla zobrazena nad průběhem 2 v oscilogramu znamenají číslo kroku „Step“ v tabulce, která je vpravo na obrázku č. 11. Lze si všimnout na oscilogramu, že driver použitý při pořízení oscilogramu krokování, zvyšuje proud druhou fází při vypnutí proudu jednou fází a tím vyrovnává pokles momentu (drží moment na konstantní hodnotě).



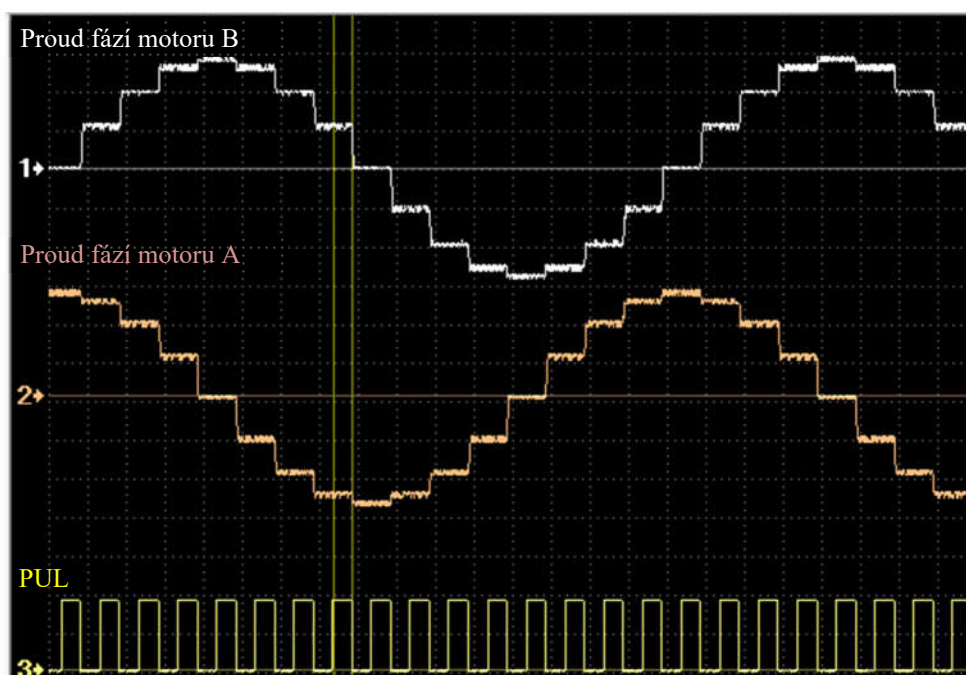
Obrázek 11 Řízení s polovičním krokem a tabulka spínacích kombinací [5]



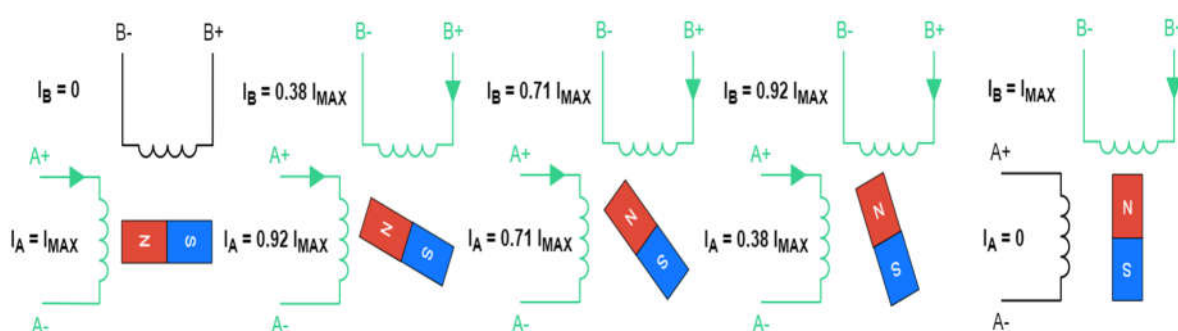
Obrázek 12 Průběhy proudu oběma fázemi motoru při řízení s polovičním krokem [6]

1.3.3 Mikrokrokování

Mezi široce používané krokování patří mikrokrokování. V tomto režimu lze dosahovat velmi malé velikosti kroku a konstantního točivého momentu. Je to dáno tím, že cívkám se dodává regulovaný proud tvořený sinusovkou. V jedné fázi se postupně zmenšuje proud a v druhé fázi se naopak zvyšuje (obrázek č. 13). Využívá se pulzně šířkové modulace (PWM) a kvůli tomu je nutné použití výkonových tranzistorů ve spínacím režimu pro dosažení minimálních tepelných ztrát.



Obrázek 13 Průběhy proudu oběma fázemi motoru při mikrokrokování [6]



Obrázek 14 Mikrokrokování [1]

Na obrázku č. 14 je ukázáno, jak funguje mikrokrokování. V prvním kroku je ve fázi A maximální proud $I_A = I_{MAX}$ a ve fázi B je proud $I_B = 0$. V dalších krocích jsou proudy regulovány tak, aby bylo vždy dosaženo pootočení rotoru o $22,5^\circ$ ve směru hodinových ručiček. Takže je nakonec docíleno pozic $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ a 90° . Toto mikrokrokování má dvakrát menší velikost kroku než řízení s polovičním krokem, ale lze jít ještě dále. [1]

Při tomto řízení se mohou vyskytnout určité problémy. Například, když potřebný točivý moment je větší než točivý moment, který může motor mezi dvěma mikrokroky vyvinout, tak se motor nepootočí hned, ale až proběhne několik mikrokroků a točivý moment vzroste natolik, že bude schopen překonat mechanické odpory a odpor připojené zátěže. A když je malý točivý moment, tak je malý i přídržný moment, takže síly od zátěže mohou motor vychýlit z přesné polohy až do polohy, která odpovídá celému kroku. Aby se eliminovaly tyto neduhy, tak výrobci nabízejí motory, které jsou určeny pro mikrokrokování, ale za cenu snížení přídržného momentu, takže je možné k nim připojit malou zátěž a nejlépe neměnnou.

Takže lze konstatovat, že mikrokrokování sice zvyšuje počet kroků na otáčku, ale nezvyšuje přesnost krokování. Přínosem tohoto krokování je hlavně hladší běh motoru, snížení mechanických hluků a rezonancí.

1.4 Způsoby napájení krokových motorů

Krokové motory lze napájet dvěma způsoby.

1.4.1 Napájení jmenovitým napětím

U některých krokových motorů se můžeme setkat se satorovými cívkami, které mají pracovní proud jmenovité velikosti při napájení ze standardizovaných napájecích napětí.

Takové motory se používají pro nejjednodušší aplikace, protože způsob napájení nedovoluje docílit větších točivých momentů ani vysokých rychlostí otáčení. Tyto motory se často používají například v automobilovém průmyslu (nastavení světlometů, nastavení zpětných zrcátek). V praxi se můžeme setkat s napájecími napětími 5, 12 a 24 V.

1.4.2 Napájení proudem jmenovité hodnoty

Většina krokových motorů se napájí zdrojem proudu, který zaručuje nejrychlejší nárůst proudu satorovým vinutím a eliminuje nevýhody způsobené napájením jmenovitým napětím.

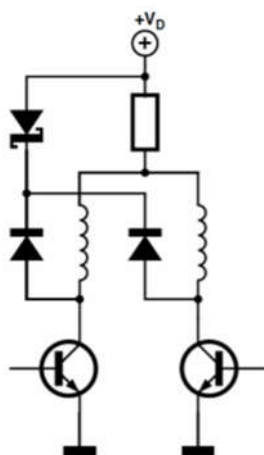
Úkolem tohoto napájení je řídit velikost proudu tekoucím satorovým vinutím, omezit ztrátový výkon na odporu vinutí na přípustnou hodnotu a docílit při tom co nejlepších mechanických parametrů motoru.

Maximální ztrátový výkon je určen tepelnou odolností vinutí, který ve většině případů není uveden v katalogovém listu u daného motoru. Empirická zkušenost říká, že běžný krokový motor se nemá oteplít o více než 65 °C nad teplotu okolního prostředí. [7]

Aby nebyl překročen maximální ztrátový výkon, tak je možné využít spojitěho omezení proudu nebo pulsního řízení proudu. Oba způsoby lze použít jak pro bipolární, tak i pro unipolární výkonové budiče.

1.4.2.1 Omezení proudu předřadným rezistorem

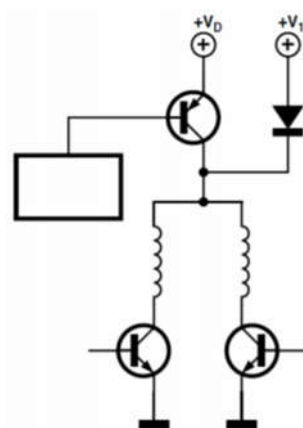
K omezení proudu je využit sériově zapojen předřadný rezistor o velikosti, která zajistí omezení proudu na požadovanou hodnotu (obrázek č. 15). Takže lze použít při napájení vyšší napětí a nárůst proudu ve vinutí na jmenovitou hodnotu je rychlejší. Nevýhodou zapojení je velký ztrátový výkon na předřadném rezistoru. Díky Zenerově diodě je možné dosahovat vyšších rychlostí otáčení, ale více se napětově namáhají spínací prvky. [7]



Obrázek 15 Schéma omezení proudu předřadným rezistorem [7]

1.4.2.2 Dvuhladinové řízení proudu

Při tomto řízení se využívá sekundárního zdroje s vyšším napětím ($+V_1$), který je k vinutí připojen, dokud proud vinutím nenaroste na požadovanou hodnotu. Poté je zdroj odpojen. Nevýhoda spočívá v nutnosti použít druhý napájecí zdroj. Schéma tohoto řízení je nakresleno níže na obrázku č. 16.

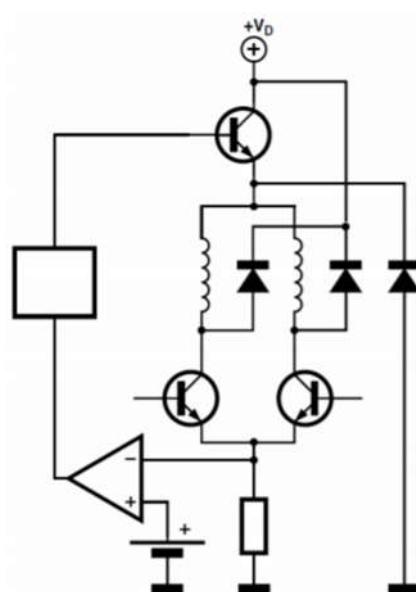


Obrázek 16 Dvuhladinové řízení proudu [7]

1.4.2.3 Pulsní řízení proudu

Při tomto způsobu řízení (obrázek č. 17) je napájecí napětí několikanásobně větší než jmenovité napětí motoru, ale doba nárustu napětí na vinutí je kratší oproti předcházejícím zapojení.

Díky využití pulsního řízení je dodržena jmenovitá hodnota napětí a tím i velikost proudu vinutím motoru. Aby se udržel proud na konstantní hodnotě, snímá se jeho velikost jako úbytek napětí na rezistoru, který je v sérii s vinutím motoru. Toto napětí má funkci zpětné vazby a je předáno obvodu, který řídí velikost proudu protékajícím vinutím.



Obrázek 17 Pulsní řízení proudu [7]

2 ARDUINO PLATFORMA

2.1 Motivace

V tomto projektu je nutné sledovat stavy tlačítek, přepínačů a enkodérů na ovladačích a na základě jejich stavů je nutné v určité logice řídit LED diody a ovládat krokový motor. Na to je nejvhodnější použít nějaký mikroprocesor. Abychom nemuseli řešit programátor k nahrání kódu do mikroprocesoru, napájení nebo taktování procesoru, tak je dobré použít něco, co už tyto všechny zmiňované věci obsahuje.

A právě jednou z možností je použít Arduino platformu. Vyniká příznivou cenou oproti jiným stejně zaměřeným platformám (Parallax Basic Stamp, Phidgets,...). Ceny originálních osazených Arduino desek začínají už od pár stovek korun (záleží na typu desky). Dále obsahuje programátor, krystal, napájecí zdroj 5 V, takže nám to ulehčí práci a čas, který bychom vložili do návrhu DPS s mikrokontrolérem. Programování takové desky lze realizovat pomocí jazyka C/C++, tak není nutné mít znalost jednotlivých strojových instrukcí pro daný procesor.

2.2 Popis Arduina

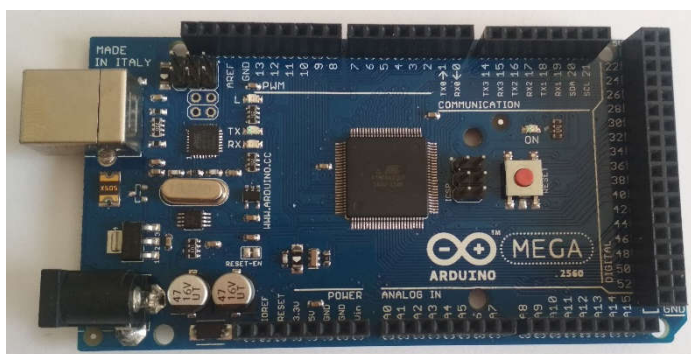
Arduino je otevřená elektronická platforma, která je vytvořena na jednoduché desce plošných spojů (DPS) a programovatelná ve vývojovém prostředí Arduino IDE nebo i v jiném prostředí pomocí jazyka C/C++. Arduino bylo vytvořeno pro rychlé vytváření prototypových návrhů pro komunitu se základní znalostí programování a elektroniky. Tyto desky dokážou získávat údaje od snímačů a senzorů v reálném čase a na základě toho ovládat své výstupy (např. změnit stav LED diody). Tyto základní desky lze rozšiřovat o tzv. Arduino shiely, které slouží pro rozšíření funkce Arduina a většinou pro tyto shiely existují softwarové knihovny pro okamžité použití. Dnes tuto platformu využívá opravdu velké množství lidí a své projekty sdílejí na internetu včetně kódu a návrhu DPS pro tvorbu daného projektu.

2.2.1 Hardware

Základní Arduino desky jsou v podstatě mikrokontrolér s krystalem, převodníkem pro komunikaci s PC a s napájecím zdrojem 5 V. Arduino desky obsahují 8-bitový mikrokontrolér AVR od firmy Atmel a většinou také mají I/O piny přístupné přes dutinkové nebo kolíkové lišty, takže se externí periferie jednoduše připojují.

2.2.1.1 Typy desek

V dnešní době je na trhu nespočet druhů Arduino desek, kde každá deska má své zaměření. Nejpoužívanější deskou od Arduina je Arduino Uno. Tato deska obsahuje externí převodník i USB a je osazena mikroprocesorem Atmega328 s taktovací frekvencí 16 MHz. Pro rozsáhlejší projekty, kde je potřeba mnoho I/O pinů nebo více interních periférií MCU AVR nebo je potřeba více paměti lze použít Arduino Mega 2560 (obrázek č. 18), která je rozměrnější oproti desce Arduino Uno. Má větší paměť pro program, větší počet interních periférií a větší počet pinů. Běží na procesoru Atmega 2560. Porovnání dvou zmiňovaných Arduino desek je možné vidět v tabulce č. 1.



Obrázek 18 Arduino Mega 2560

Tabulka 1 Srovnání Arduino Uno a Arduino Mega 2560

Arduino deska	Mikrokontrolér	Počet I/O pinů	Počet analog. vstupů	Flash paměť [kB]
Arduino Uno	Atmega 328	14	6	32
Arduino Mega 2560	Atmega 2560	54	16	256

2.2.2 Software

Oficiální vývojové prostředí pro psaní programu pro Arduino desky je Arduino IDE. Programovací jazyk vychází z jazyka Wiring a má totožný zápis jako jazyk C/C++. Základní Arduino knihovna Wiring obsahuje například funkce pro práci s výstupy a vstupy, správu přerušení a čas reprezentující uplynulé mikrosekundy od zapnutí mikrokontroléru. V tomto prostředí lze také využívat např. sériový monitor pro čtení nebo posílání znaků po sériové lince nebo sériový plotter, který zastupuje funkci jednoduchého osciloskopu.

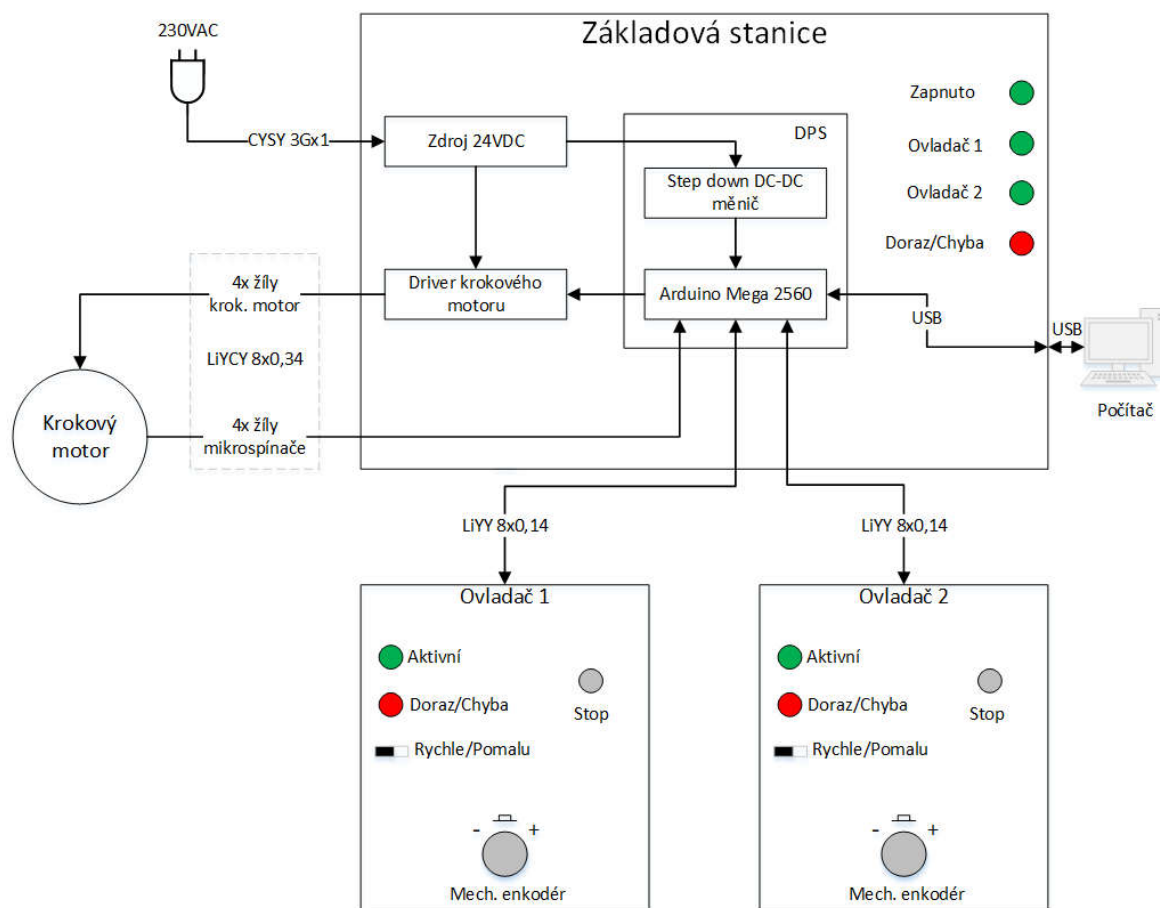
3 NÁVRH SYSTÉMU ELEKTRONICKÉHO PLYNU

Podmínky pro funkční systém elektronického plynu byly popsány v kapitole *Požadavky na systém elektronického plynu* na straně 11. Na základě požadavků na zařízení jsem navrhl systém elektronického plynu.

Systém bude sloužit pro ovládání plynového lanka motocyklu na dynamometrickém stanovišti za účelem ladění řídicí jednotky.

3.1 Blokové schéma návrhu systému elektronického plynu

Níže na obrázku je zjednodušené schéma mého návrhu systému pro ovládání plynového lanka motocyklu. Dále bude stručně popsán celý systém a jeho funkce. Podrobnosti o jednotlivých použitých komponentech jsou uvedeny v kapitole 3.6 *Použité komponenty*.



Obrázek 19 Blokové schéma elektronického plynu

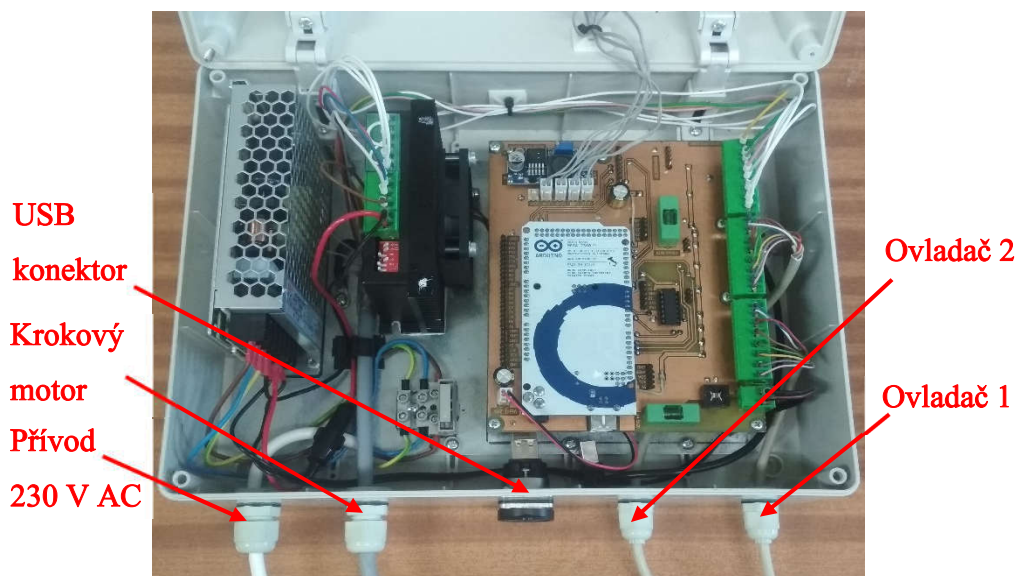
3.2 Popis systému

Tento systém se skládá ze tří hlavních částí a těmi jsou základová stanice, ovladače a krokový motor.

Základová stanice

Základová stanice bude umístěna v jámě u dynamometrického stanoviště. Výstupy ze základové stanice jsou čtyři kabelové průchodky a jeden USB konektor pro nahrání kódu do Arduino desky bez nutnosti otevírat krabici. Všechny konektory splňují krytí IP67.

V základové stanici je umístěn zdroj 230 VAC / 24 VDC – 4,5 A, který je napájen ze sítě 230 VAC. Je k němu připojen driver krokového motoru a Arduino deska přes stejnosměrný snižovací měnič napětí 24 VDC / 5 VDC. Tento měnič má za úkol snížit napětí ze 24 V na 5 V a napájet tímto napětím Arduino desku. Srdcem celého zařízení je Arduino Mega 2560, která v reálném čase sleduje všechny vstupy, jako jsou tlačítka, enkodéry, přepínače na ovladačích a na základě těchto vstupů ovládá výstupy (LED diody na víku základové stanice, driver krokového motoru). Níže na obrázku č. 20 je fotografie základové stanice, kde jsou označeny významy kabelových průchodek a konektoru.

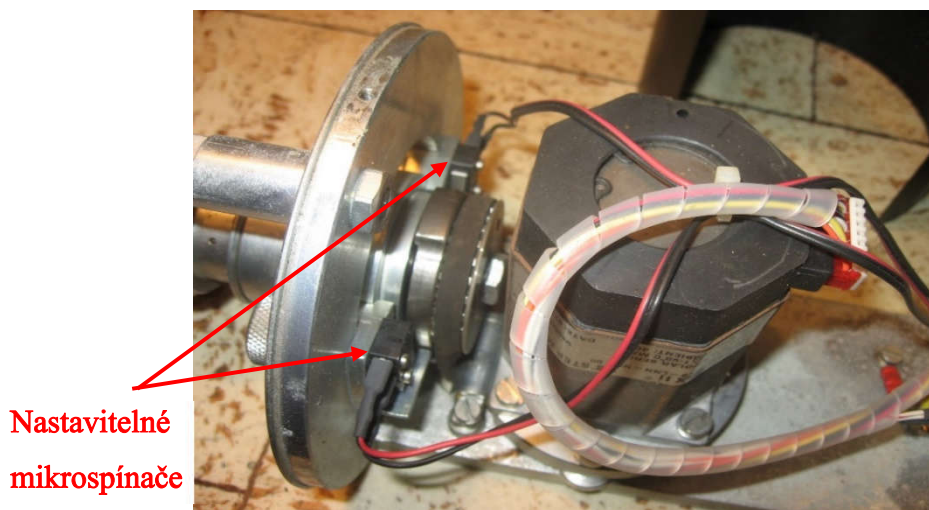


Obrázek 20 Základová stanice s otevřeným víkem

Krokový motor

Šasi krokového motoru, na kterém je připevněn krokový motor, navíc ještě obsahuje dva mikrospínače reprezentující dorazy pro krokový motor. Tyto dorazy jsou mechanicky nastavitelné a mají za úkol vymezit oblast, ve které krokový motor může krokovat (obrázek č. 21). Z toho důvodu kabel vedoucí ke krokovému motoru obsahuje 8 žil, kabel je

typu LiYCY 8x0,34. Tento kabel je stíněný a zakončen patnácti pinovým konektorem d-sub. Druhý konec je rozdělen v základové stanici na jednotlivé žíly, které jsou rozvedeny do příslušných svorkovnic.



Obrázek 21 Mikrospínače umístěné na šasi krokového motoru

Ovladače

Přenos signálu mezi ovladačem a řídicí elektronikou je přímý tzn., že signály z ovladače zpracovává až řídicí elektronika umístěná v základové stanici. Ovladače jsou spojeny se základovou stanicí pomocí nestíněného osmi žilového kabelu LIYY 8x0.14. Tento kabel byl vybrán na základě jeho malého vnějšího průměru, dobré flexibility a oděruvzdornosti. Jednotlivé žíly jsou barevně odlišeny bez barevného opakování, takže se jednoduše rozeznávají. Zakončení kabelu je provedeno směrem k ovladači devíti pinovým d-sub konektorem a druhý konec kabelu je veden přes vývodku umístěnou na stěně základové stanice a zapojen do Arduina. Na obrázku č. 22 je fotografie obou ovladačů.



Obrázek 22 Fotografie ovladačů. Ovladače jsou identické.

Pro přívod elektrické energie do samotného zařízení je použit desetimetrový měděný třížilový kabel CYSY 3Gx1 H05VV-F o průřezu jedné žíly 1mm².

3.3 Ovládání systému

Systém se spouští jednoduchým zastrčením zástrčky do zásuvky 230 V AC. Při zapnutí systému se rozsvítí na 2 s všechny LED diody na základové stanici i ovladačích a následně zhasnou kromě zelené LED diody Zapnuto. Ta zůstane svítit a tím signalizuje, že zařízení je zapnuté a funkční. Rozsvícením všech LED diod uživatel zjistí, zda jsou všechny kontrolky funkční a může se na jejich indikaci spolehnout. Poté krokový motor odkrokuje na dolní doraz a rozsvítí se zelená LED dioda Zapnuto a v případě funkčního dolního dorazu se rozsvítí i červená dioda na základové stanici Doraz/Chyba.

Systém má za úkol ovládat krokový motor na základě ovládacích prvků na ovladačích. Ovladače ovladač 1 a ovladač 2 jsou identické a v jednu chvíli může být obsluhován jen jeden z nich. Uživatel může ovládat krokový motor pomocí enkodéru, který je umístěn právě na ovladači. Otočením enkodéru ve směru hodinových ručiček se bude krokový motor otáčet směrem k hornímu dorazu a tím otevírat plyn motocyklu. Při otáčení enkodéru na druhou stranu (proti směru hodinových ručiček) bude krokový motor krokovat směrem k dolnímu dorazu a tím zavírat plyn motocyklu.

Ovladač

Enkodér umístěný na ovladači disponuje také tlačítkem, které slouží pro přihlášení daného ovladače a tím zprovoznění všech jeho prvků. Stane-li se, že uživatel zapne např. ovladač 1 v době, kdy je přihlášen ovladač 2, tak se ovladač 2 automaticky odhlásí a všechny prvky na něm umístěné se stanou nefunkčními do doby opětovného zapnutí. Následným stiskem tlačítka na enkodéru při přihlášeném ovladači se ovladač odhlásí.

Když je ovladač přihlášen, tak zelená LED dioda signalizuje, že ovladač je aktivní a jeho ovládací prvky jsou funkční.

Svítící červená dioda znamená, že krokový motor je právě na dolním nebo horním dorazu. Jestliže tato dioda bliká, tak indikuje chybu. Podle počtu bliknutí lze zjistit o jakou chybu se jedná. Toto je popsáno v kapitole 3.5 *Signalizace chyb*.

Tlačítko Stop na ovladači má za úkol zavřít rychle plyn za jakýchkoliv okolností.

Poloha rychle na přepínači znamená, že jeden krok na enkodéru znamená 10 kroků pro krokový motor. Poloha pomalu představuje, že jeden krok na enkodéru je jeden krok pro krokový motor.

Základová stanice

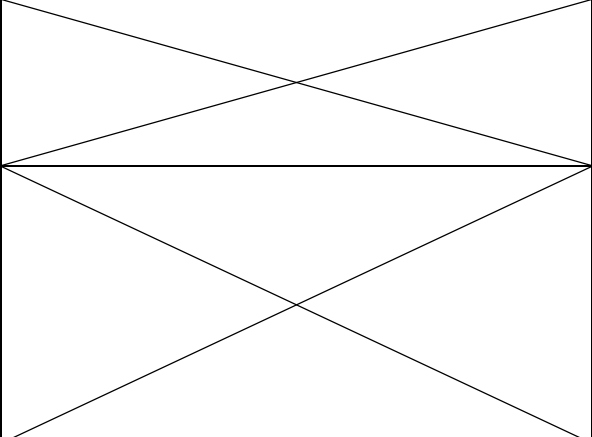
Stav napájeného funkčního zařízení připravené k ovládání (použití) indikuje zelená horní LED dioda Zapnuto.

Další dvě zelené diody dávají znamení o aktivaci daného ovladače a nejnižší umístěná červená dioda má stejný význam jako červené diody na ovladačích (svítí – dolní nebo horní doraz sepnut / bliká – indikace chyby).

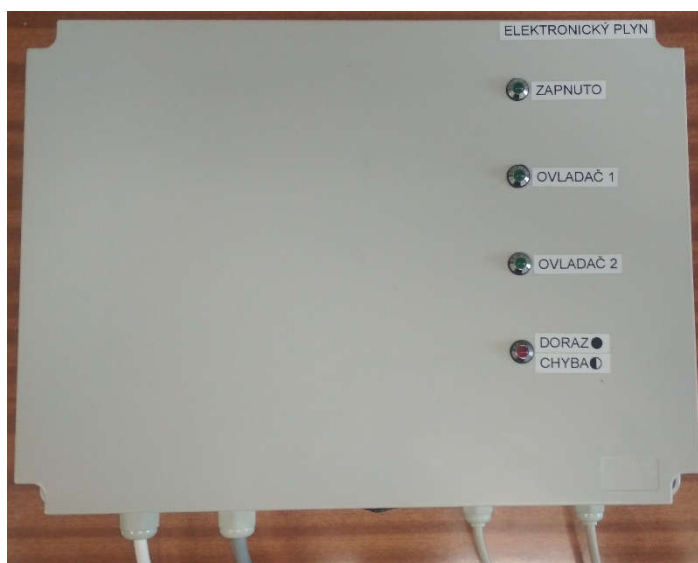
3.4 Shrnutí významu LED diod

Níže v tabulce č. 2 je shrnuto význam indikací všech LED diod využitých v tomto projektu.

Tabulka 2 Význam LED diod v systému elektronického plynu

Základová stanice			Ovladač		
LED dioda	Barva LED	Význam indikace	LED dioda	Barva LED	Význam indikace
<i>Zapnuto</i>	Zelená	Celý systém je funkční a připraven k použití	<i>Aktivní</i>	Zelená	Daný ovladač je vybrán (aktivní)
<i>Ovladač 1</i>	Zelená	Ovladač 1 je vybrán (aktivní)	<i>Doraz/Chyba</i>	Červená	Svítí – horní nebo dolní doraz je sepnutý. Bliká – indikace chyby
<i>Ovladač 2</i>	Zelená	Ovladač 2 je vybrán (aktivní)			
<i>Doraz/Chyba</i>	Červená	Svítí – horní nebo dolní doraz je sepnutý. Bliká – indikace chyby			

Na obrázcích č. 23 je zobrazen pohled na víko základové stanice, kde jsou umístěné LED diody. Na obrázku č. 24 je zobrazen čelní pohled na ovladač, na kterém lze vidět LED diody a ovladací prvky.



Obrázek 23 Pohled na víko základové stanice



Obrázek 24 Čelní pohled na ovladač 2

3.5 Signalizace chyb

Jak již bylo řečeno v předešlých podkapitolách, tak všechny červené diody (na základové stanici i na ovladačích) mají stejný význam své indikace (svítí – horní nebo dolní doraz sepnut, bliká – indikace chyby). Blikání LED diod není nikterak posunuté tzn, že všechny LED diody blikají ve stejném sledu.

Když LED diody indikují chybu tak mění stav každých 200 ms (200 ms svítí, 200 ms nesvítí). Počet bliknutí LED diod (nesvítí → svítí) znamená určitou chybu (viz tabulka č. 3) a následně rozdílnou reakci na ni. Mohou nastat dvě různé indikace. Buď LED diody bliknou jednou nebo dvakrát. Po ukončení blikání LED diody na 2 s zhasnou (časová prodleva) a tím uživatel pozná, že skončilo blikání a „přečte“ chybu. Po 2 s začnou diody opětovně vyblikávat kód chyby.

Když se zjistí, že jeden z dorazů není sepnut při odkrokování maximálního počtu kroků z aktuální pozice, tak z dané pozice nelze krokovat směrem k vadnému dorazu. Při udělení alespoň jednoho kroku od vadného dorazu se povolí krokování oběma směry tzn. že uživatel může krokovat směrem k vadnému dorazu až do opětovného rozpoznání chybějícího signálu z mikropínače. Je to proto, že během zapnutého systému lze měnit pozici dorazů krokového motoru.

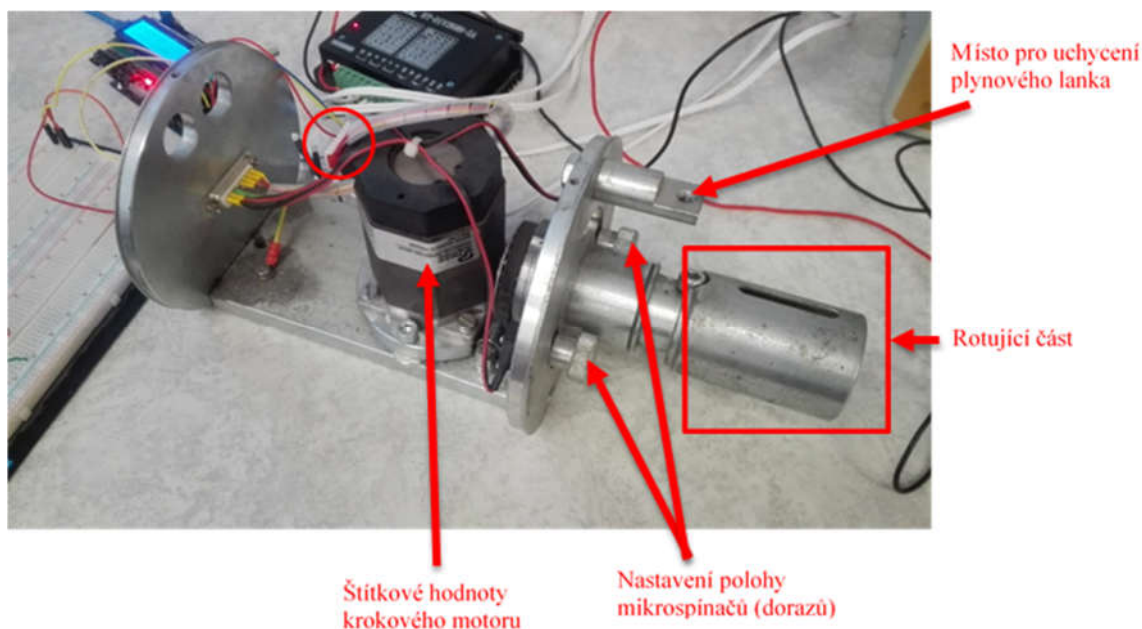
Tabulka 3 Tabulka chyb

Počet bliknutí	Chyba	Reakce na chybu
1	Z aktuální pozice byl odkrokován maximální počet kroků, který lze vykonat na maximálním rozsahu krokového motoru, ale přesto nedošlo k sepnutí dolního dorazu.	Nelze krokovat směrem na dolní doraz.
2	Z aktuální pozice byl odkrokován maximální počet kroků, který lze vykonat na maximálním rozsahu krokového motoru, ale přesto nedošlo k sepnutí horního dorazu.	Nelze krokovat směrem na horní doraz.

3.6 Použité komponenty

3.6.1 Krokový motor

Tento kompletní akční člen, který je zobrazen na obrázku č. 25 jsem dostal jako existující komponentu, takže sestavení držáku ani vybrání typu krokového motoru nebylo mým úkolem.



Obrázek 25 Použitý krokový motor s mechanickým držákem

Jedná se o hybridní dvoufázový krokový motor POWERMAX II model P22NRXB-LNN-N8-00. Z krokového motoru je vyvedeno osm vodičů, protože každá fáze je rozdělena na dvě půlky, aby se motor mohl připojit jak bipolárně, tak i unipolárně. V tomto projektu je krokový motor připojen jako krokový motor s bipolárním uspořádáním vinutí. Půlky vinutí tvořící každou fázi jsou spojené do série, motor se ovládá pomocí čtyř vodičů (2 vodiče pro každou fázi).

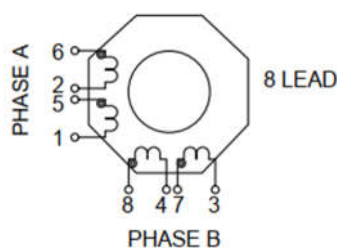
V červeném kroužku na obrázku č. 25 je označena lišta vývodů krokového motoru. Čísla vývodů a jejich význam je uveden v tabulce č. 4.

Aby motor mohl krokovat je zapotřebí dodávat elektrické pulsy do fází ve správném pořadí. Toho docílíme správným připojením ke driveru.

Motor je připevněn na mechanický držák, který obsahuje řemenici pro uchycení lanka plynu. Na šasi jsou také umístěné dva nastavitelné mikrospínače, který určují dorazy pro krokový motor a vymezují mu hranici, po které se může pohybovat.

Tabulka 4 Popis vývodů krokového motoru

Označení fáze	Pól fáze	Číslo vývodu	Barva vodiče
Fáze A	A+	6	Černá
	A-	1	Oranžová
Fáze B	B+	8	Červená
	B-	3	Žlutá
		2	Bílá s černým pruhem
		5	Bílá s oranžovým pruhem
		4	Bílá s červeným pruhem
		7	Bílá se žlutým pruhem

**Obrázek 26** Schématické znázornění zapojení vývodů krokového motoru [8]

Jelikož je krokový motor zapojen bipolárně, tak jsou vyvedeny pouze čtyři vodiče na konektor d sub 15. Z obrázku č. 26 lze vidět, že vývody 4, 7 a 2, 5 by se použily v případě, že by motor se zapojil jako unipolární. V tomto projektu jsou spojené a nevyvedené na d-sub konektor.

Tabulka 5 Parametry krokového motoru [8]

Velikost motoru: 78,7 x 57,1 mm (NEMA23)
Počet fází: 2
Krok motoru = 1,8°
$I_s(\text{dc}) = 2,3 \text{ A}$
$V_s(\text{dc}) = 65 \text{ V}$
$T_{\text{MAX}} = 130 \text{ °C}$ při okolní teplotě 40 °C
$n = 1500 \text{ ot/min}$
$R_{\text{lf}} = 1,52 \text{ } \Omega$
$L_{\text{lf}} = 8,4 \text{ mH}$

V tabulce č. 5 jsou uvedeny parametry krokového motoru, ze kterých například lze vyčíst, že na jednu otáčku motoru v základním (plném) krokování je třeba 200 kroků. Proud motorem by neměl přesáhnout 2,3 A a teplota motoru by neměla být vyšší než 130 °C, při teplotě okolí 40 °C.

Krokový motor může udělat maximálně 211 kroků od dorazu k dorazu při nastavení mikrospínačů na úplný okraj (co nejdále od sebe). Otáčky motoru jsou redukovány jednoduchým řemenovým převodem 1:2 do pomala (řemenice se 13 a 26 zuby)

3.6.2 Driver krokového motoru

Tento driver krokového motoru, který je zobrazen na obrázku č. 27 jsem dostal jako existující komponentu, takže vybrání driveru krokového motoru nebylo mým úkolem.



Obrázek 27 Pohled na driver HY-DIV268-N-5A [9]

Jedná se o driver HY-DIV268N-5A, který dodává elektrické pulsy do fází krokového motoru ve správném pořadí. Driver je vhodný pro pohon dvoufázových hybridních krokových motorů s napětím 12 až 48 V a s proudem do 5 A. Obsahuje ochrany proti podpětí/přepětí, nadproudu a proti zkratu.

Tento driver řídí proud do fází motoru. Toto řízení realizuje pomocí pulsního řízení proudu na frekvenci 42,37 kHz. Když přijde povel pro vstup PUL, tak se proud oběma fázemi zvýší na 100 % po dobu 100 ms a po této době se sníží na 30 % své hodnoty.

Výše na obrázku č. 27 lze vidět driver, který byl použit v této práci. Na vrchní straně šasi driveru lze nalézt dvě tabulky, které slouží pro vlastní nastavení driveru. Dle první tabulky vlevo se nastavuje výstupní fázový proud do krokového motoru a podle druhé tabulky se nastavuje velikost kroku. Toto nastavení se provádí pomocí přepínačů na červeném DIP panelu, který je umístěn nalevo od zelené svorkovnice na přední straně. Jestliže je přepínač dole, tak je nastaven do ON, v opačném případě je nastaven do OFF.

Nastavení přepínačů (proud: SW1 – SW3 a velikost kroku: SW4 – SW6) je nutné nastavit dle tabulky č. 6. Což znamená, že je driver nastaven na výstupní proud 1,2 A a velikost kroku je nastavena na celý krok.

Tabulka 6 Nastavení přepínačů na DIP panelu

Fázový proud: 1,2A			Velikost kroku: 1		
SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6
ON	OFF	ON	OFF	ON	ON

Bohužel tabulka pro nastavení fázového proudu neodpovídá realitě a liší se v některých případech o více než 1 A. Z toho vyplývá, že i při správném nastavení přepínačů na DIP panelu si můžeme zničit krokový motor. V tabulce č. 7 je uveden skutečný naměřený proud fázemi pro jednotlivé kombinace přepínačů SW1 až SW3. Tabulka také ukazuje, že při nastavení 1,8 A by skutečný fázový proud do motoru přesáhl jmenovitou hodnotu použitého krokového motoru (2,3 A). Proto je fázový proud na driveru krokového motoru nastaven na hodnotu 1,2 A.

Tabulka 7 Naměřený proud fázemi krokového motoru [10]

SW1	SW2	SW3	Proud napsaný v tabulce na driveru (A)	Naměřený I_{high} [A] na výstupu B-	Naměřený I_{low} [A] na výstupu B-
ON	ON	ON	0,2	0,38	0,10
OFF	ON	ON	0,6	1,42	0,41
ON	OFF	ON	1,2	2,16	0,62
OFF	OFF	ON	1,8	2,70	0,78
ON	ON	OFF	2,5	3,36	0,98
OFF	ON	OFF	3,3	3,66	1,08
ON	OFF	OFF	4,2	3,88	1,16
OFF	OFF	OFF	5,0	4,08	1,22

Kde:

- I_{high} – proud fází motoru během prvních 100 ms od povelu „udělej krok“
- I_{low} – proud fází motoru po 100 ms od povelu „udělej krok“

Vstupy driveru:

- EN-, EN+ – slouží pro zapnutí/vypnutí driveru. Vstup je invertovaný, takže v logické úrovni L (do vstupu neteče proud) je driver zapnut.
- PUL-, PUL+ – slouží pro ovládací impulzy, kde sestupná hrana signálu PUL (přerušeni proudu do vstupu) generuje povel pro jeden krok.
- DIR-, DIR+ – slouží pro určení směru otáčení krokového motoru., takže v logické úrovni H (do vstupu teče proud) je driver nastaven pro otáčení po směru hodinových ručiček.
- DC-, DC+ – slouží pro napájení driveru.

Vstupy EN, PUL a DIR jsou vybaveny optočleny s obvodem pro omezení proudu na 20 mA, takže je lze spínat přímo (bez předřadného rezistoru) z I/O pinu Arduina ($I_{MAX} = 40 \text{ mA}$), ale v tomto projektu jsou optočleny na zmiňovaných vstupech spínané přes tranzistor pro zajištění menšího odběru proudu z pinů Arduina.

Výstupy driveru:

- A-, A+ – jedna fáze motoru
- B-, B+ – druhá fáze motoru

3.6.3 Ventilátor

Ventilátor SUNON MF60152V2-1000U-A99 je připevněn na driver krokového motoru, který chladí a zároveň slouží pro rovnoměrnější rozložení teploty uvnitř zavřené krabice při zapnutém zařízení.

Jedná se o slabší větráček se jmenovitým proudem 40 mA, napětím 24 V DC a 3900 ot/min. Disponuje příkonem 1,096 W a nemá žádné snímání otáček či detekci rotace.

Byl vybrán pro jeho rozměry, nízkou hlučnost (38 dB) a malý odběr proudu. Je napájen přímo ze zdroje 24 V DC, který bude popsán v další podkapitole.

3.6.4 Arduino Mega 2560

Jedná se o desku postavenou na mikrokontroléru Atmega2560. Obsahuje 54 I/O pinů z nichž 14 lze použít jako PWM výstup. Dále má 16 analogových vstupů, keramický rezonátor 16MHz, připojení USB a napájecí konektor. Maximální proud, který může téci jedním I/O pinem je 40 mA. Celkový odběr z pinů Arduina nesmí překročit 200 mA. Pracovní napětí je 5 V. Velikost Flash paměti je 256 kB. Dále obsahuje 8 kB SRAM a 4 kB EEPROM paměť. [11]. Napájení desky je zajištěno pomocí snižovacího měniče a jeho výstup je zapojen do pinu 5 V (ne do pinu Vin), aby se zabránilo velké výkonové ztrátě na lineárním stabilizátoru Arduina.

3.6.4.1 Odběr proudu z pinů Arduina

V tabulce č. 8 je uveden proudový odběr z jednotlivých pinů Arduina. K celkovému odběru je nutno přičíst ještě vlastní odběr Arduina, který činí přibližně 35 mA. Takže celkový odběr Arduino Mega 2560 v této práci je 132,01 mA. Význam pinů EN-, DIR-, PUL- byl již vysvětlen v podkapitole 3.6.2 *Driver krokového motoru*. Smysl LED1 – LED4 lze vidět v posloupnosti od shora dolů na obrázku č. 19 na základové stanici vpravo, kde jsou znázorněny jednotlivé diody. LED_G1 a LED_R1 je zelená a červená dioda na ovladači 1. Obdobně platí pro názvy LED_G2, LED_R2 pro ovladač 2.

Tabulka 8 Proudový odběr Arduina z napájecí větve 5 V

Vlastní název pinů	Číslo pinu Arduina	Odběr proudu [mA]
EN-	29	0,336
DIR-	31	0,336
PUL-	33	0,336
LED1	41	12
LED2	43	12
LED3	45	12
LED4	47	12
LED_G1	8	12
LED_R1	7	12
LED_G2	0	12
LED_R2	14	12
Celkový odběr proudu z výstupních pinů		97,01
Vlastní odběr Arduina		35

3.6.5 Zdroj 5 V DC

Měnič má za úkol přeměnit 24 V DC napětí na 5 V DC. Zdroj 5 V DC slouží pro napájení řídicích obvodů v základové stanici. Pro tento účel byl použit spínaný zdroj 24 V DC / 5 V DC.

Důvodem pro zapojení měniče je obejít lineárního stabilizátoru na Arduino, aby se zabránilo nadměrnému zahřívání stabilizátoru na Arduino kvůli velké výkonové ztrátě, která by na něm vznikala. Navíc by Arduino ani nešlo napájet napětím 24 V. Z těchto důvodů jsem se rozhodl použít DC-DC měnič ze 24 V DC na 5 V DC.

Jedná se o step-down DC-DC měnič s LM2596, kde výstupní napětí lze přesně nastavit trimrem od 1,25 – 35 V. Přičemž na vstup lze připojit napětí od 3,2 – 40 V, ale nesmí se zapomenout, že se jedná o snižující měnič, takže výstupní napětí musí být menší než vstupní.

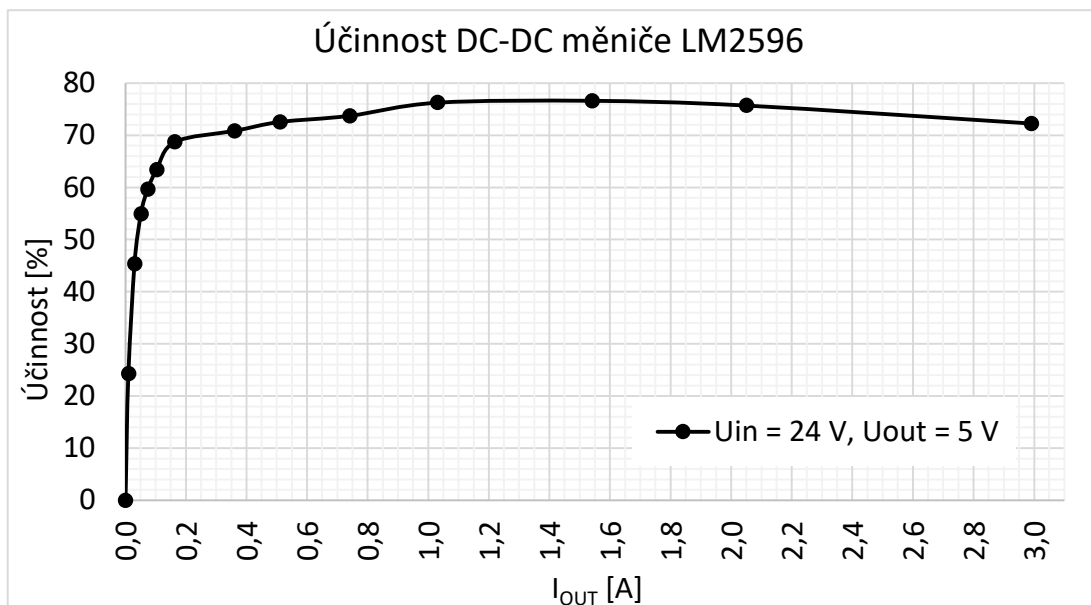


Obrázek 28 Snižující DC-DC měnič 24 V DC / 5 V DC s LM2596 [12]

3.6.5.1 Výpočet výkonu, příkonu a výkonové ztráty snižujícího měniče 24 V DC / 5 V DC s LM2596

Pro tyto výpočty bude potřeba znát U_{OUT} , I_{OUT} , a účinnost snižujícího měniče. Výstupní napětí měniče je v tomto projektu nastaveno na 5 V DC. Výstupní proud je dán hlavně Arduino deskou a také ostatními spotřebiči umístěnými na základové desce (Tabulka č. 9). Účinnost měniče η je vyčtena z obrázku č. 29, který znázorňuje závislost účinnosti měniče na odebíraném proudu. Data z měření pro vytvoření tohoto grafu mi poskytl vedoucí práce Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D.

Vstupní napětí je 24 V DC, jeho zdrojem je měnič Meanwell 230 V AC / 24 V DC.



Obrázek 29 Graf závislosti účinnosti snižujícího měniče 24 V / 5 V na odebíraném proudu [13]

Tabulka 9 Určení maximální velikosti I_{OUT} na napájecí větvi 5 V

Spotřebiče snižujícího DC-DC měniče	Výpočet	Odebíraný proud [mA]
Arduino Mega 2560	Viz 3.6.4.1 Odběr proudu z pinů Arduina	132,01
Schmittův obvod 74HC14	Viz datasheet (I_{CC})	0,020
Vstupy driveru EN+, PUL+, DIR+	$3 * (5\text{ V} / 270\text{ Ohm})$	55,56
10x Pull-up rezistor 10k Ω	$10 * (5\text{ V} / 10000\text{ Ohm})$	5
2x Pull-up rezistor 1k Ω	$2 * (5\text{ V} / 1000\text{ Ohm})$	10
Rádiový modul RFM69HCW	Viz datasheet	50
Bluetooth modul HC-05	Viz datasheet	30
Celkový proud I_{OUT} odebíraný ze zdroje 5 V v tomto projektu		202,59
Celkový proud I_{OUT} odebíraný ze zdroje 5 V s osazením zeleně označených spotřebičů		282,59

1. varianta – výpočet spotřeby v tomto projektu (bez osazení bluetooth a rádiového modulu)

$$P_{OUT} = U_{OUT} * I_{OUT} = 5 * 0,20259 = 1,01 \text{ W} \quad (1)$$

$$P_{IN} = \frac{P_{OUT}}{\eta} = \frac{1,01}{0,7} = 1,44 \text{ W} \quad (2)$$

$$\Delta P = P_{IN} - P_{OUT} = 1,44 - 1,01 = 0,43 \text{ W} \quad (3)$$

Kde: P_{IN} vstupní výkon, U_{OUT} výstupní napětí, I_{OUT} výstupní proud, P_{OUT} výstupní výkon, η účinnost, ΔP výkonová ztráta.

2. varianta – výpočet spotřeby s osazením bluetooth a rádiového modulu

$$P_{OUT} = U_{OUT} * I_{OUT} = 5 * 0,28259 = 1,41 \text{ W} \quad (4)$$

$$P_{IN} = \frac{P_{OUT}}{\eta} = \frac{1,41}{0,7} = 2,02 \text{ W} \quad (5)$$

$$\Delta P = P_{IN} - P_{OUT} = 2,02 - 1,41 = 0,61 \text{ W} \quad (6)$$

Kde: P_{IN} vstupní výkon, U_{OUT} výstupní napětí, I_{OUT} výstupní proud, P_{OUT} výstupní výkon, η účinnost, ΔP výkonová ztráta.

Výsledky vzorců (1), (2) a (3) udávají výkon, příkon a výkonovou ztrátu snižujícího DC-DC měniče v tomto projektu. S porovnáním výsledků vzorců (4), (5) a (6) lze konstatovat, že osazením bluetooth a rádiového modulu se zvýší příkon přibližně o 0,5 W.

Výsledky vzorců v první variantě udávají maximální spotřebu na napájecí větvi 5 V v tomto projektu tzn. spotřebu, při které budou svítit všechny LED diody na základové stanici i na ovladačích, budou sepnuty k zemi všechna tlačítka, všechny přepínače a také obě stopy na enkodérech. Takového stavu nelze dosáhnout, protože může být vždy aktivní pouze jeden ovladač a zároveň nelze dosáhnout stavu, kdy budou uzemněny obě stopy jednoho enkodéru.

Výsledky vzorců ve druhé variantě udávají to samé jako varianta první s tím, že ještě navíc jsou připojeny bluetooth a rádiový modul. Tím se zvýší maximální odebíraný proud o 80 mA.

Výsledky vzorců se ještě využijí pro výpočet odebíraného výkonu ze spínaného zdroje 230 V AC / 24 V DC.

Na obrázku č. 29 lze vidět, že účinnost tohoto zdroje není valná i přesto, že výrobce udává účinnost tohoto zdroje až 92 %. Nejlepší účinnost měniče je v rozmezí odebíraného proudu 1 – 1,6 A a činí přibližně 76 %.

3.6.6 Zdroj 24 V DC

Úkolem zdroje je napájení celé základové stanice (základová deska, driver krokového motoru). Spínaný zdroj v této práci byl použit MEAN WELL LRS-100-24 (obrázek č. 30).

Před vybráním zdroje proběhlo měření napájecího proudu driveru krokového motoru při krokování a v klidovém stavu. Na základě tohoto měření (výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 11) byl vybrán zdroj o výkonu 108 W a 4,5 A.

Dále byl vybrán kvůli vysoké účinnosti (90 %) a osazením integrovanými ochranami jako jsou ochrana proti přepětí a přetížení. Parametry vybraného zdroje je přehledně uvedeno v tabulce č. 10.

Tabulka 10 Parametry spínaného zdroje 230 V AC / 24 V DC

Rozsah vstupního AC napětí a frekvence	85 – 264 V AC, 47 – 63 Hz
Výstupní DC napětí	21,6 – 28,8 V
Zvlnění výstupního napětí	150 mV špička-špička
Nastavení přepět'ové ochrany	• 28,8 – 33,6 V • pro obnovu funkce je nutné zdroj odpojit a znovu připojit
Nastavení ochrany proti přetížení	• 110 – 150 % jmenovitého výstupního výkonu • s automatickým obnovením funkce
Pracovní rozsah teplot	-30 až +70 °C



Obrázek 30 Spínaný zdroj MEAN WELL LRS-100-24 [14]

3.6.6.1 Teoretický výpočet příkonu na napěťové úrovni 24 V DC

V tabulce č. 11 je uveden souhrn příkonů jednotlivých komponent a na základě součtu jednotlivých příkonů byl vybrán spínaný zdroj, který je zobrazen na obrázku č. 30.

Tabulka 11 Tabulka celkového příkonu na napěťové úrovni 24 V DC

Komponenta	Příkon [W]
Základová deska v tomto projektu	1,44
Ventilátor	1,096
Driver (když se krokuje)	60
Driver (když se nekrokuje)	31,2
Teoretický celkový příkon (když se krokuje)	62,536
Teoretický celkový příkon (když se nekrokuje)	33,736

Příkon základové desky je vlastně spotřeba spotřebičů na výstupu snižujícího DC-DC měniče, o které jsem se zabýval v podkapitole 3.6.5.1 *Výpočet výkonu, příkonu a výkonové ztráty snižujícího měniče*.

Hodnotu příkonu pro ventilátor jsem zjistil z katalogového listu daného ventilátoru. Typ a parametry ventilátoru jsou popsány v podkapitole 3.6.3 *Ventilátor*.

Příkon driveru krokového motoru byl vypočítán z měření, které bylo provedeno před koupí zdroje. Měření probíhalo na driveru HY-DIV268N-5A a jeho přepínače byly nastaveny dle tabulky č. 6, která je umístěna v podkapitole 3.6.2 *Driver krokového motoru* (fázový proud: 1,2 A, velikost kroku: 1).

Výsledkem byl průběh proudu do driveru, proud fází A- a průběh napětí na vstupu PUL. Takže jsem mohl změřit velikost proudu do driveru při krokování a když se nekrokuje. Maximální hodnota proudu tekoucího do driveru při krokování byla 2,5 A (kurzor A na CH1 na obrázku v příloze A), a když se nekrokuje byla hodnota proudu 1,3 A. Takže jednoduchým součinem napájecího napětí driveru (24 V) s těmito proudy jsem zjistil maximální příkon driveru při krokování a v klidovém režimu.

Z průběhu uvedeného v příloze A je vidět, že při nastavení přepínačů na fázový proud 1,2 A je skutečný proud fází motoru téměř 2,3 A. Z toho důvodu se přepínače nenastavují na hodnotu 1,8 A, protože skutečný proud fází motoru by překročil jmenovitý proud krokového motoru (2,3 A).

Po sečtení příkonů jednotlivých komponent dostaneme celkový příkon na napěťové úrovni 24 V DC, když se nekrokuje a při krokování.

Na základě těchto hodnot byl právě vybrán výše popisovaný spínaný zdroj, který dokáže dodávat 108 W. Rezerva o velikosti 37 W (108 W - 63 W) je z důvodu takového, aby se zdroj hodně nezatěžoval a tím nerostla jeho pracovní teplota uvnitř zavřené krabice do vysokých hodnot. Přece jen v teplých měsících v jámě u dynamometrického stanoviště může být okolní teplota vysoká a v uzavřené základové stanici bude teplota ještě vyšší. Navíc ke zvýšené teplotě uvnitř krabice bude významně přispívat ještě driver krokového motoru.

3.7 Teoretický příkon celého zařízení

Po vypočítání příkonu na 24 V větvi, který činil v klidovém stavu 33,736 W a při krokování 62,536 W, lze jednoduchým výpočtem zjistit příkon celkového zařízení. Využijeme účinnosti $\eta = 90 \%$ spínaného zdroje MEAN WELL LRS-100-24 (230 V AC / 24 V DC), kterou deklaruje výrobce Meanwell.

Když krokový motor nekrokuje, je spotřeba celého zařízení 37,48 W. Když se krokovat začne, stoupne spotřeba celého zařízení na 69,48 W. Výsledky rovnic (7) a (8) se mohou lišit od reálného změření z důvodu nižší účinnosti zdroje, než deklaruje výrobce zdroje 230 V AC / 24 V DC.

$$\text{Když se krokuje:} \quad P_{IN} = \frac{P_{OUT}}{\eta} = \frac{62,536}{0,9} = 69,48 \text{ W} \quad (7)$$

$$\text{Když se nekrokuje:} \quad P_{IN} = \frac{P_{OUT}}{\eta} = \frac{33,736}{0,9} = 37,48 \text{ W} \quad (8)$$

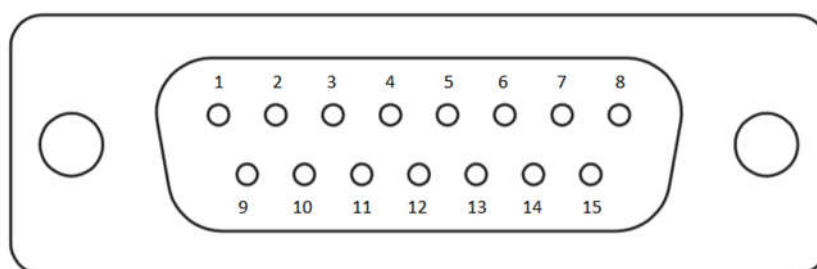
Kde: P_{IN} příkon zdroje (na straně 230 V AC), P_{OUT} výkon zdroje (na straně 24 V DC), η účinnost zdroje.

4 SCHÉMA ZAPOJENÍ

V této kapitole postupně popíši zapojení mezi všemi komponenty. Nejdříve popíši zapojení krokového motoru ke driveru, následně připojení všech modulů k Arduino desce, a nakonec zapojení ovladače.

4.1 Připojení krokového motoru k základové stanici

Jak již bylo zmíněno krokový motor je umístěn na šasi, který obsahuje na protilehlé straně od rotující části patnácti pinový d-sub konektor typu samec. Jeho schématické znázornění je zobrazeno na obrázku č. 31 a pohled na konektor je myšlen zvenčí, kam se budou fyzicky připojovat konektory z driveru a ze základové desky. K tomuto konektoru je připojen osmi žilový kabel LiYCY 8x0,34, který vede do základové stanice a jeho čtyři žíly pro vedení fázového proudu jsou připojeny ke driveru krokového motoru a další čtyři žíly pro sledování stavů dvou mikropsínačů jsou připojeny do svorkovnice DRIVER umístěné na základové desce. Kabel je stíněný a jeho stínění je připojeno na montážní desku v základové stanici, na které jsou umístěné všechny komponenty (základová deska, driver krokového motoru, zdroj 230 V AC / 24 V DC). A druhý konec stínění je spojen se šasi krokového motoru.



Obrázek 31 Schématické znázornění konektoru d-sub 15 na šasi krokového motoru

Na následující stránce v tabulce č. 12 je přehledně uvedeno, jak je připojen krokový motor k šasi a následně šasi připojeno přes kabelovou průchodku do driveru krokového motoru umístěného v základové stanici. V další tabulce č. 13 je uvedeno zapojení mikropsínačů krokového motoru k základové desce do konektoru DRIVER.

Tabulka 12 Připojení krokového motoru ke driveru

Driver	Základová stanice	Šasi krokového motoru	Krokový motor
<i>Označení výstupu</i>	kabelová průchodka M16 IP67	<i>Číslo pinu d-sub konektoru</i>	<i>Číslo vývodu</i>
A+		4	6
A-		3	1
B+		2	8
B-		1	3

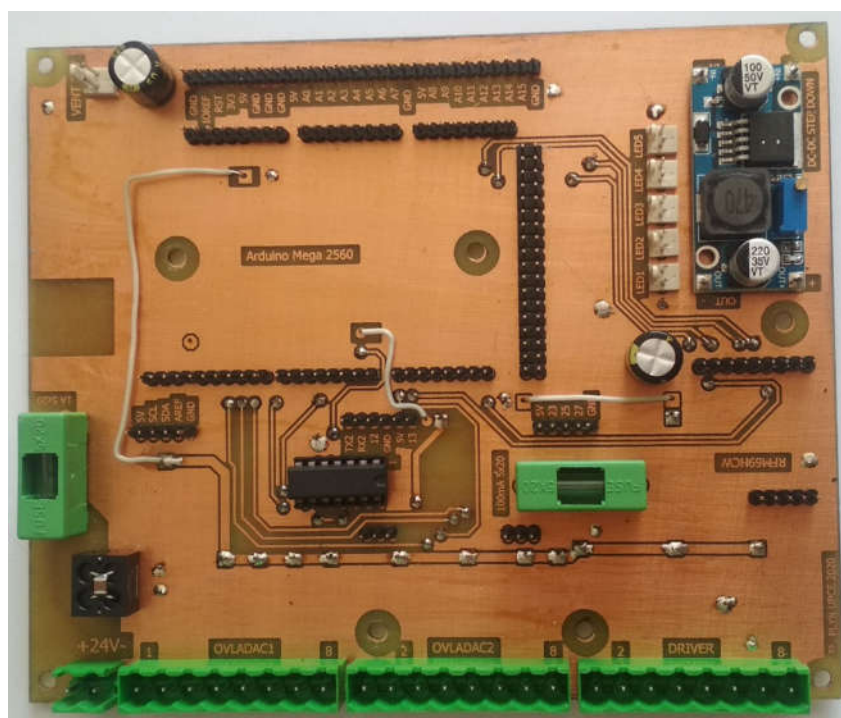
Dodatek k tabulce č. 12: K šasi krokového motoru je připojen PE vodič (zelenožlutá barva), který je připojen na číslo pinu 6 d-sub konektoru. Stíněním kabelu je tento ochranný vodič připojen k montážní desce v základové stanici.

Tabulka 13 Připojení mikrospínačů k základové desce do konektoru DRIVER

Základová deska (konektor DRIVER)		Základová stanice	Šasi krokového motoru	
<i>Název pinu</i>	<i>Číslo pinu</i>	kabelová průchodka M16 IP67	<i>Číslo pinu d-sub konektoru</i>	<i>Barva vodiče za konektorem</i>
MiS1	5		7	červeno-černá
MiS2	6		8	červeno-černá
GND	7		14	černá
GND	8		15	černá

4.2 Základová deska

Základová deska je umístěna v základové stanici společně s driverem krokového motoru a se zdrojem 230 V AC / 24 V DC. Na základové desce je umístěn snižující DC-DC měnič, Arduino Mega 2560, tvarovač 74HC14 a další součástky jakou jsou kondenzátory, cívky, rezistory, tranzistory konektory, svorkovnice a další. Deska, která je srdcem celého zařízení je Arduino Mega 2560. Na tuto desku jsou v konečném důsledku připojeny všechny vstupy a výstupy. V této podkapitole bude postupně rozebráno připojení všech externích modulů k desce Arduino.



Obrázek 32 Základová deska

4.2.1 Napájení

Aby mohla zařízení správně fungovat je zapotřebí přivést elektrickou energii, která bude všechna zařízení napájet. V tomto projektu je napájení přivedeno na základovou desku ze spínaného zdroje 230 V AC / 24 V DC (KON_24VDC_IN).

Napájení má za úkol dodat elektrickou energii ventilátoru, který je spojen se zdrojem přes základovou desku a snižující DC-DC měniči, který převede 24 V DC na 5 V DC (příloha B). Napájení je realizováno přes 1 A pojistku (POJ1) a vstupní odrušovací filtr BNX-016, který se používá ve spínacích zdrojích.

V příloze C je zobrazen výstup snižujícího měniče (pokračování přílohy B). Lze vidět, že napětí prochází LC filtrem za účelem zmenšení zvlnění výstupního napětí DC-DC měniče. Dalším důvodem je také předejití možného rušení od radio desky RFM, která nejspíše bude

v budoucnu osazena (v tomto projektu osazena není, ale v DPS je pro tuto desku vyhrazené místo). Dále vpravo na obrázku v příloze C je výstup 5 V a tímto napětím se napájejí tyto komponenty na základové desce:

- Arduino Mega 2560
- Konektor DRIVER
- Tvarovač 74HC14
- Pinová lišta pro bezdrátový modul RFM69HCW Radio
- Pinové lišty JP1 – JP6

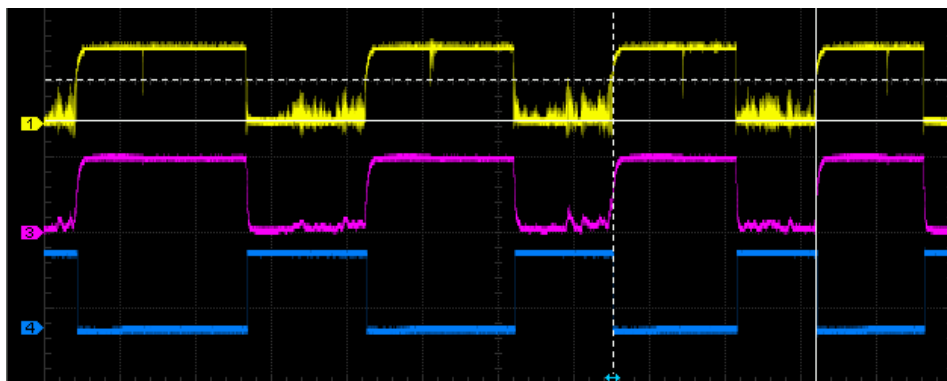
4.2.2 Připojení ovladačů

Ovladače připojené přes metalické vedení poskytují surové signály, které se zpracovávají v základové stanici. Na ovladače není ani vyvedeno trvalé napájecí napětí, protože to vzhledem k použitému typu a způsobu ovládacích prvků není třeba. Z ovladače 1 je kabelem veden signál až na svorkovnici OVLADAC 1 na základové desce. Obdobně je to i u ovladače 2. Připojení ovladačů k Arduino desce je zobrazeno v tabulce č. 14.

Na každém pinu svorkovnice OVLADAC1 a OVLADAC2 je ESD ochrana proti elektrostatickému výboji. Jedná se o jednopolaritní transil typu PESD5V0L1UA, který se otevírá při napětí 6,4 V. Odpor 6,8 k Ω plní funkci sériového ochranného rezistoru.

Jelikož piny svorkovnice 3 až 7 jsou spínány k zemi, tak na tyto vstupy je připojen pull-up rezistor 10 k Ω (jedná se o vstupy z pohledu Arduino desky).

Na obrázku č. 33 je vidět signál od enkodérů CLK, SW, DT (CH1), které jsou připojeny přes RC filtr pro odfiltrování šumu ze signálu (CH3) a následně tvarovačem 74HC14 vytvářeny pro čistý obdélníkový signál do Arduina (CH4). Připojení Schmittova obvodu mezi Arduino deskou a svorkovnicí je napsáno v tabulce č. 15. Schéma připojení ovladačů k Arduino desce je v příloze D. Výstupy LED_G a LED_R jsou připojeny přes 270 Ω rezistor. Takže LED diody jsou napájeny 5 V / 12 mA.



Obrázek 33 Zpracovávaný signál z jedné stopy enkodéru

Tabulka 14 Připojení ovladačů k Arduino desce

Svorkovnice OVLADAC1 a OVLADAC2			Arduino Mega 2560		
			Číslo pinu Arduina		
Význam pinu	Číslo pinu	Název pinu	OVLADAC1	OVLADAC2	Směr pinu
Zelená dioda	1	LED_G	8	11	Výstupní
Červená dioda	2	LED_R	7	14	Výstupní
Tlačítko stop	3	TL_STOP	6	10	Vstupní
Přepínač rychle/pomalů	4	PREPINAC	5	9	Vstupní
Stopa B enkodéru	5	CLK	4	18	Vstupní
Tlačítko na enkodéru	6	SW	3	19	Vstupní
Stopa A enkodéru	7	DT	2	20	Vstupní
Ground (zem)	8	GND	GND	GND	

Pozn. k tabulce č. 14: Žlutě označené řádky znamenají, že mezi daný pin svorkovnice a pin Arduina je připojen ještě Schmittův obvod dle tabulky č. 15.

Tabulka 15 Pinout 74HC14 pro tvarování signálů z enkodérů

	74HC14			
	OVLADAC1		OVLADAC2	
Název pinu na svorkovnici	Číslo pinu vstupu	Číslo pinu výstupu	Číslo pinu vstupu	Číslo pinu výstupu
CLK	11	10	5	6
SW	9	8	3	4
DT	13	12	1	2

4.2.3 Připojení driveru krokového motoru

Připojení driveru k základové desce je realizováno pomocí svorkovnice DRIVER. Tato svorkovnice je osmi pinová, ale k připojení driveru se využívají čtyři piny. Zbylé se využívají pro připojení mikropínačů umístěných na šasi krokového motoru. Schéma připojení svorkovnice DRIVER je zobrazené v příloze E.

Každý pin svorkovnice je chráněn transilem, který slouží jako ochrana proti elektrostatickému výboji. Jedná se o jednopolaritní transil typu PESD5V0L1UA, který se otevírá při napětí 6,4 V.

Vstupy EN-, PUL- a DIR- driveru krokového motoru jsou z Arduina spínány ke GND pomocí tranzistorů BC846. Díky tomu je odběr pinů z Arduina menší, než kdyby se vstupy driveru spínaly přímo z pinů Arduina. Piny EN+, PUL+, DIR+ jsou na driveru proklemovány a je na ně ze základové desky přivedeno napájecí napětí 5 V. Kolektorové rezistory (R51, R52, R53) mají hodnotu 0 Ω , protože vstupy driveru už obsahují obvody proudového omezení na 20 mA. Kdyby se v budoucnu měnil driver za jiný typ driveru, který by měl jinak řešené vstupy (např. pouze samotný optočlen), je nutné výše uvedené rezistory na desce vyměnit.

Všechny odpory zobrazené v příloze E jsou typu SMD o velikosti 1206.

V tabulce č. 16 je shrnuto připojení driveru k Arduino desce.

Tabulka 16 Připojení driveru krokového motoru k Arduino Mega 2560

Svorkovnice DRIVER		Arduino Mega 2560
Číslo pinu	Název pinu	Číslo (název) pinu
1	+5 V	5 V
2	EN-	29
3	DIR-	31
4	PUL-	33

4.2.4 Připojení mikrospínačů

Mikrospínače reprezentující dorazy krokového motoru jsou připojeny k základové desce pomocí svorkovnice DRIVER. Mikrospínače spínají ke GND, z tohoto důvodu jsou na svorkovnici DRIVER použity pull-up rezistory $1\text{k}\Omega$ připojené k 5 V. Každý mikrospínač se do základové desky připojí mezi pin MiSx a GND, ke x je číslo mikrospínače. Na vstupu svorkovnice je filtrační kondenzátor 100 nF a další kondenzátor je před pinem Arduina pro odfiltrování šumu ze signálu a tím bezchybného určení, zda mikrospínač je sepnut či rozepnut. Signály z mikrospínačů jsou taženy jedním kabelem společně s přívodními vodiči krokového motoru. Proud fázemi krokového motoru je řízen driverem pomocí PWM, což způsobuje vysoké rušení na signálových vodičích mikrospínačů. Bez použití filtračních kondenzátorů by byl signál z mikrospínačů nepoužitelný pro vyhodnocení. V tabulce č. 17 je shrnuto připojení mikrospínačů k Arduino desce a schéma připojení mikrospínačů je v příloze E.

Tabulka 17 Připojení mikrospínačů k Arduino desce

Svorkovnice DRIVER		Arduino Mega 2560
Číslo pinu	Název pinu	Číslo pinu
5	MiS1	35
6	MiS2	37
7	GND	GND
8	GND	GND

4.2.5 Připojení rádiového modulu pro bezdrátové ovladače

V tomto projektu se bezdrátové ovladače nepoužívají, takže radiový modul 433/868 MHz není osazen, ale na DPS je vyhrazené místo pro tento typ modulu (obrázek č. 34), aby bylo zařízení připraveno na možné osazení modulu v budoucnu.



Obrázek 34 Rádiový modul Adafruit RFM69HCW [15]

Počítá se s rozšířením o bezdrátový modul od firmy Adafruit model RFM69HCW Radio. Tento modul lze napájet napětím od 3,3-5,5 V. Používá pásmo 433 MHz nebo 868 MHz. Výrobce uvádí dosah až 500 m. V tabulce č. 18 je ukázáno, jak jsou připojeny piny bezdrátového modulu k Arduino desce. Schéma zapojení je ukázáno v příloze F.

Tabulka 18 Připojení rádiového modulu RFM69HCW k Arduino Mega 2560

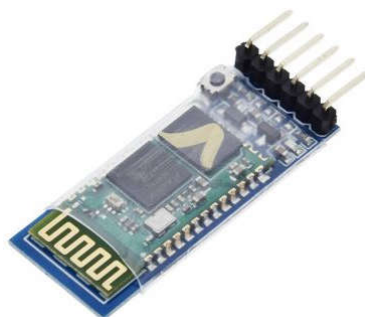
RFM69HCW	Arduino Mega 2560
Vin	5 V
GND	GND
SCK	SCK (Digital 52)
MISO	MISO (Digital 50)
MOSI	MOSI (Digital 51)
CS	CS (Digital 53)
G0	21 (INT0)
RST	15

Při zapojování modulu je většina pinů striktně daná a nelze je zapojit na jakýkoli digitální pin Arduino. Je to z důvodu, že knihovna nemá softwarovou podporu SPI, takže se musí využívat hardwarové SPI porty. Na druhou stranu zapojení v režimu SPI je snadné, protože nevyžaduje připojení tolika pinů.

Pin G0 musí být zapojen na takový pin Arduino, který umožňuje externí přerušení. Pin RST může být zapojen na jakýkoli digitální pin Arduino.

4.2.6 Připojení bluetooth modulu pro bezdrátové spojení s PC

V tomto projektu se nepoužívá bezdrátové spojení s PC, ale pro tento modul je na DPS vyhrazené místo na pinové liště JP6.



Obrázek 35 Bluetooth modul HC-05 [16]

Počítá se s rozšířením o Bluetooth modul HC-05, který obsahuje Bluetooth ve verzi 2.0 a komunikuje s Arduinem přes sériovou linku. Dosah je omezen na deset metrů. Napájecí napětí musí být v rozsahu 3,3 V až 6 V. Proudový odběr v klidovém stavu je kolem 2 mA, při komunikaci je proudový odběr kolem 30 mA. Níže v tabulce je shrnuto připojení tohoto modulu k Arduino desce. Schéma zapojení Bluetooth modulu je ukázáno v příloze G.

Tabulka 19 Připojení bluetooth modulu HC-05 k Arduino Mega 2560

Bluetooth modul HC-05 (pinová lišta JP6)		Arduino Mega 2560
<i>Název pinu</i>	<i>Číslo pinu</i>	<i>Název (číslo) pinu</i>
BT_EN	1	13
+5V	2	5V
GND	3	GND
BT_RX	4	RX2 (Digital pin 17)
BT_TX	5	TX2 (Digital pin 16)
BT_STA	6	12

4.2.7 Připojení LED diod umístěných na základové stanici

LED diody jsou stejným způsobem připojeny do Arduino desky jako LED diody umístěné na ovladačích. MCU → 270 Ω rezistor → LED → GND. Mikrokontrolér může ovládat 5 LED diod, ale osazeny jsou jen čtyři. Fyzicky na desce jsou připájeny konektory, poté pomocí kablíků jsou spojeny s LED diodami připevněnými na víku základové stanice. V tabulce č. 20 je napsané, jak jsou jednotlivé diody připojeny k Arduino desce. LED diody jsou připojeny k mikrokontroléru podle pozitivní logiky. To znamená, že daná LED dioda svítí, když na pinu Arduina je logická jednička.

LED diody mají parametry: 2 VDC, 20 mA, 100 mcd, IP 67, ale provozují se na 12 mA, takže mají nižší svítivost.

Tabulka 20 Připojení LED diod umístěných na víku základové stanice k mikrokontroléru

LED dioda	Význam LED diody	Arduino Mega 2560
LED1	Zapnuto	41
LED2	Ovladač 1 aktivní	43
LED3	Ovladač 2 aktivní	45
LED4	Svítlí – Doraz sepnut Bliká – Indikace chyby	47
LED5	nevyužito	49

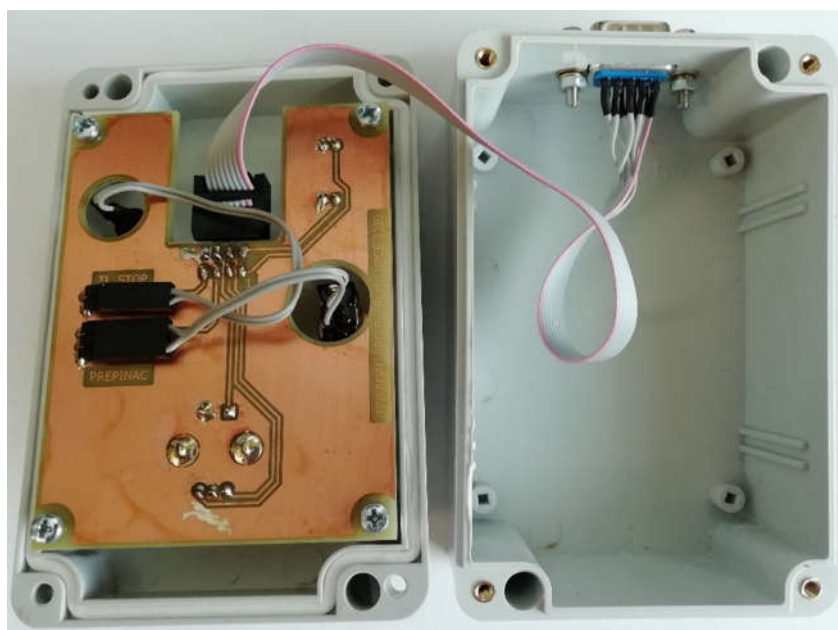
4.2.8 Připojení ventilátoru

Připojení ventilátoru lze vidět v příloze B, kde je připojen na hladinu 24 V DC před snižujícím měničem (ve schématu má název PSH02-02P VENTILATOR). Je připojen přes dvou pinový PSH konektor. Z ventilátoru jsou vyvedeny dva kabely – červený a černý. Červený kabel je připojen na +24 V DC, černý na GND na základové desce.

4.3 Ovladač

Jak již bylo zmíněno, tento systém obsahuje dva ovladače, kterými lze ovládat krokový motor. Ovladače jsou identické, takže mají stejně rozvrhnuté umístění prvků na svém víku i stejné schéma zapojení, které je zobrazeno v příloze CH.

Na stěně krabičky je umístěný osmi pinový d-sub konektor (viz. příloha H). Od tohoto konektoru je vnitřkem krabičky pomocí plochého kabelu připojena DPS ovladače do konektoru pro ploché kabely s názvem MLW08A (ve schématu SV1). Poté je rozvod k jednotlivým součástkám uskutečněn pomocí měděných cest. Význam jednotlivých pinů konektoru je stejný jako význam pinů na svorkovnici s názvem OVLADAC1 a OVLADAC2, který je uveden v tabulce č. 14 v podkapitole 4.2.2 *Připojení ovladačů*.



Obrázek 36 Vnitřní propojení ovladače

Součástky TL_STOP a PREPINAC jsou zapojeny přes PSH konektor. Oba prvky jsou zapojeny v negativní logice vůči Arduino desce. To znamená, že při připojení prvku k zemi je na vstupu Arduino logická nula (stisk tlačítka, přepínač v poloze rychle).

LED diody jsou připojeny v pozitivní logice, takže LED diody svítí, když na pinu Arduina je logická jednička.

Mechanický rotační enkodér byl vybrán na základě počtu aretovaných poloh na jednu otáčku a délky hřídele, aby se na hřídelku nechal nasunout knoflík se sklíčidlem pro lepší ovladatelnost enkodéru. Na jednu otáčku enkodéru je potřeba překonat 24 aretovaných poloh a délka hřídele je 25 mm. Enkodér obsahuje tlačítko, které je připojeno v negativní logice k Arduino desce.

4.4 Použité ochrany v zařízení

4.4.1 Jištění zařízení

Všechny ochrany jsou použity z důvodu ochrany celého systému elektronického plynu proti přetížení (nadproudu) pomocí trubičkových pojistek o velikosti 5 x 20 mm o různých hodnotách.

Přívod elektrické energie ze sítě 230 V AC do spínaného zdroje Meanwell 230 V AC / 24 V DC je chráněn pojistkou T 1,6 A (pomalá) umístěnou v pojistkovém pouzdře ARK-3P proti přetížení.

Dále je chráněn vstup driveru krokového motoru (DC+) pomocí F 5 A (rychlá) pojistky umístěnou v pojistkovém pouzdře na kabel. Vstupy driveru s 5 V logikou (EN+, PUL+, DIR+) jsou chráněny F 100 mA pojistkou.

Dalším komponentou v základové stanici, kterou je nutné chránit, je základová deska. Přívod 24 V DC do základové desky je chráněn F 1 A pojistkou, takže je chráněn nejen vstup snižujícího DC-DC měniče, ale i přívod ventilátoru.

4.4.2 Ochrana vstupů Arduino desky

Každý vstup, který je přiveden na základovou desku do svorkovnice DRIVER, OVLADAC1 nebo OVLADAC2 a spojen v konečném důsledku s Arduino deskou, má ochranu proti elektrostatickému výboji. Tato ochrana je složena ze dvou diskrétních součástek.

- Transil PESD5V0L1UA typu SMD
- Sériový ochranný rezistor 6,8 k Ω typu SMD o velikosti 1206

4.4.2.1 Transil PESDV0L1UA

Jedná se o jednopolaritní součástku k ochraně jednoho signálního vedení před poškozením způsobené ESD nebo jinými přechodnými stavy. Normální pracovní oblast bez omezování přepětí je od 0 do 5 V. V této napětíové hladině není signál ovlivněn funkcí přepětíové ochrany. Průrazné napětí této součástky, kdy ochrana začíná vybavovat je 6,4 V.

Tato součástka je vždy připojena katodou, co nejbližší ke svorkovnici na základové desce a anoda této součástky je zapojena směrem ke GND. Viz příloha D a E. Označení součástek ve schématu je Dx, kde x znamená číslo transilu.

4.4.2.2 Sériový ochranný rezistor 6k8 na vstupech MCU

Tento odpor byl spočítán na základě zjištěných hodnot z datasheetu transilu. Datasheet uvádí, že při maximálním proudu ochranou, který jí teče při definovaném ESD impulsu 8/20 us je napětí na transilu 12 V. Povolený proud ochrannou diodou v MCU je 1 mA.

Z toho plyne: $R = (12 \text{ V} - 5,5 \text{ V}) / 0,001 \text{ A} = 6500$. Nejbližší hodnota odporu směrem nahoru v řadě E12 je 6800 Ω .

5 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

V této kapitole bude stručně popsán postup konstrukce systému elektronického plynu. Nejdříve bylo navrženo schéma DPS ovladače. Jelikož všechny součástky pro úpravu signálu, pro ESD ochranu a pull-up rezistory jsou umístěné na základové desce, tak jsem nejdříve vybral krabičku ovladače a až poté upravil velikost DPS ovladače tak, aby se vešla do krabičky.

5.1 Ovladač

Krabička ovladače musela splňovat tyto předpoklady:

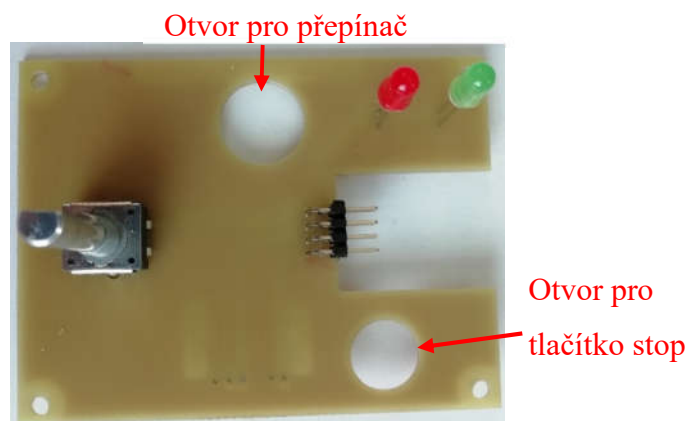
- Takové rozměry, aby krabička padla do ruky a dobře se držela
- Příznivá cena
- Vzít v potaz výšku krabičky kvůli konektoru d-sub 8

O krytí IP67 nemělo cenu uvažovat, protože utěsnit hřídelku enkodéru na takto vysoké krytí je problém.

Na základě požadavků jsem vybral krabičku Z57JH TM KRADEX a tuto krabičku jsem nakreslil v AutoCAD 2018 a v Eaglu jsem nakreslil elektrické schéma. Nakreslené schéma v AutoCADu jsem vytiskl a přiložil na víko krabičky (příloha J). Pomocí šídla jsem naznačil středy kružnic a poté příslušným vrtákem vyvrtal díry pro prvky umístěné na ovladači. Velikost vyvrtání otvorů do víka krabičky jsem vždy hledal v datasheetu u jednotlivých použitých součástek, kde tyto informace vždy byly uvedeny.

DPS ovladače je připevněna na víko krabičky pomocí čtyř distančních sloupků M3 o výšce 18 mm. Tyto distanční sloupky jsou na víko připevněny pomocí šroubů se zapuštěnou hlavou, aby hlavičky šroubů nevyčnívaly z víka krabičky.

V DPS jsou dvě díry kvůli velikosti tlačítka stop a přepínači, které jsou připevněny na víko krabičky (obrázek č. 37). Konektory pro připojení těchto dvou součástek jsou na druhé straně DPS, takže na obrázku č. 37 nejsou vidět, ale vlevo na obrázku č. 36 je lze vidět. LED diody jsou osazené přímo v DPS a prostrčené skrz otvor na víko krabičky. Dále pro osmi pinový konektor byl navrhnut výřez na DPS kvůli snadnému připojení protikusu od osmi pinového d-sub konektoru umístěném na stěně krabičky. Poslední součástkou je mechanický rotační enkodér, který má 25 mm hřídelku, aby se na hřídelku nechal nasunout knoflík se sklíčidlem pro lepší ovladatelnost enkodéru. Nákras krabičky v AutoCAD a nákras schématu a návrh desky v Eaglu jsou v přílohách CH, I, J, K a L.



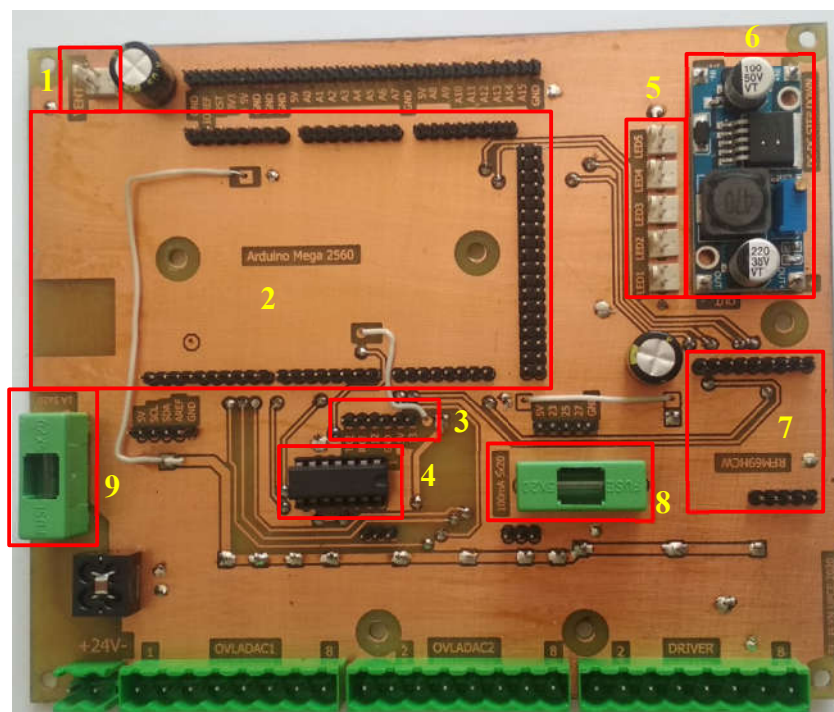
Obrázek 37 Vrchní pohled na DPS ovladače

5.2 Základová stanice

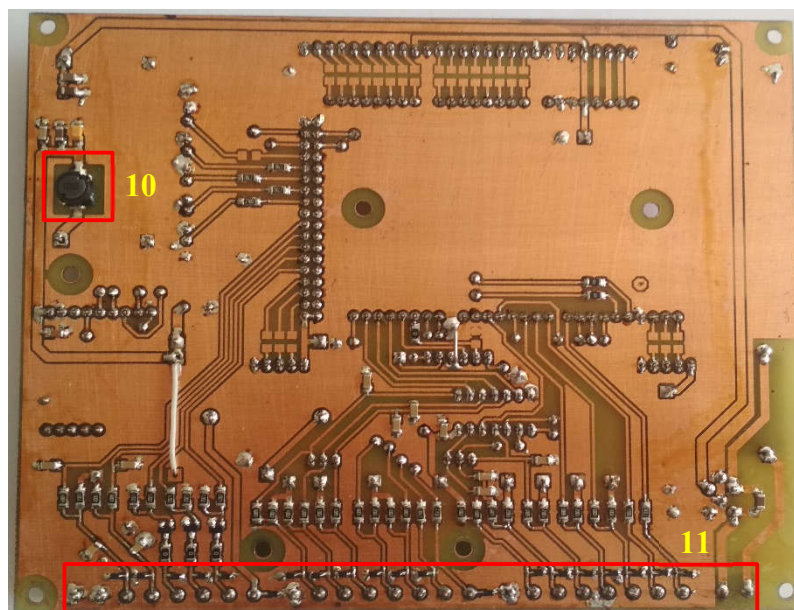
Po návrhu krabičky a DPS ovladače jsem přistoupil k návrhu základové desky. Poté jsem vybral spínaný zdroj Meanwell a s driverem krokového motoru, který jsem dostal jako existující komponentu, jsem nakonec vybral krabici, do které se všechno vejde.

5.2.1 Základová deska

Níže na obrázcích č. 38 a č. 39 jsou fotografie konečného výsledku mého návrhu základové desky. Význam čísel uvedených na komponentech je vysvětlen v tabulce č. 21.



Obrázek 38 Přední strana základové desky



Obrázek 39 Zadní strana oboustranné základové desky

Tabulka 21 Tabulka uvádějící význam čísel v obrázcích č. 38 a č. 39

Číslo	Význam
1	Konektor pro připojení ventilátoru
2	Arduino Mega 2560
3	Místo pro připojení Bluetooth modulu HC-05
4	Tvarovač 74HC14
5	Konektory pro připojení LED diod na základové stanici
6	Snižující DC-DC měnič 24 V DC / 5 V DC
7	Místo pro připojení rádiového modulu RFM69HCW
8	Pojistka F 100 mA o velikosti 5 x 20 mm chránící 5 V výstup pro napájení výstupů driveru EN+, PUL+, DIR+
9	Pojistka F 1 A o velikosti 5 x 20 mm v přívodu napájení 24 V DC
10	Cívka 22 uH na výstupu snižujícího DC-DC měniče LM2596
11	Svorkovnice umístěné dole na obrázku č. 39. V ohraničené oblasti jsou vidět na každém vstupu transily pro ESD ochranu.

Základová deska obsahuje 9 otvorů pro upevnění na montážní desku krabice. Měděné spoje pro vedení 24 V DC a 5 V DC mají šířku 1,6 mm, zbytek spojů je o šířce 0,4 mm. Základová deska je oboustranná bez prokovů a na obou stranách je zemní polygon GND, které byly nutné spojit. Oba polygony byly spojeny pomocí několika uměle vytvořených „prokovů“ (drátek, který je zapájen z obou stran desky a tím vytvoří vodivý spoj mezi oběma polygony).

Nepoužité piny Arduino desky v tomto projektu jsou „vytaženy“ na kolíkovou lištu pro snadné připojení budoucích externích modulů. Zatím se počítá o rozšíření bluetooth a rádiového modulu, kde jsou pro tyto moduly vyhrazená místa vyznačena na obrázku č. 38 v červených ohrazených oblastech pod čísly 3 a 7.

Dále dole na obrázku č. 38 jsou zelené násuvné svorkovnice pro násuvné vidlice, které lze odejmout bez odpojování jednotlivých připojených kablíků do dané vidlice. V posloupnosti zleva slouží tyto násuvné svorkovnice:

- Pro připojení ventilátoru 24 V DC
- Pro připojení ovladače 1
- Pro připojení ovladače 2
- Pro připojení driveru krokového motoru a mikrospínačů reprezentující dorazy krokového motoru

Po návrhu a zjištění přibližných rozměrů základové desky (160 x 130 mm) jsem přistoupil k výběru zdroje. Zdroj jsem vybral na základě parametrů, které jsou popsány v podkapitole 3.6.6 *Zdroj 24 V DC*. Po zjištění rozměrů vybraného zdroje, driveru krokového motoru, ventilátoru a základové desky jsem se uchýlil k výběru krabice. Schéma návrhu základové desky lze najít v přílohách M a N.

5.2.2 Krabice pro základovou stanici

Požadavky při výběru krabice:

- Vhodná velikost (počítat s rezervou pro kabelové průchodky, USB konektor a pro vedení kabelů)
- Nejdříve byl požadavek, aby krabice plnila krytí IP67, ale při potřebné velikosti krabice se cena vyšplhala do jednotek tisíc korun, takže tento požadavek byl změněn na to, aby krytí IP67 plnily všechny otvory vyvrtané do krabice (LED diody, USB konektor, kabelové průchodky).
- Krabice s možností umístění montážní desky

Nakonec jsem vybral krabici pro základovou stanici s názvem Scame SCABOX zobrazenou na obrázku č. 40. Krabice má krytí IP56 a její vnější rozměry jsou 300 x 220 x 120 mm. Tuto krabici jsem nakreslil v AutoCadu, abych dobře znázornil rozmístění komponent a navrhl všechny otvory vrtané do krabice (příloha O a P). Nakreslené schéma jsem vytiskl a přiložil (pro otvory pro LED diody) na víko krabice, vyznačil šídlem středy kružnic do krabice a následně vyvrtal. Stejný postup byl i pro vyvrtání otvorů na stěnu krabice pro kabelové vývodky a USB konektor.



Obrázek 40 Vybraná krabice pro základovou stanici

Na dno krabice je přidělán pozinkovaný montážní plech o rozměrech 284 x 173 x 1,5 mm a na tuto montážní desku jsou připevněny pomocí šroubů všechny komponenty (driver krokového motoru, zdroj 230 V AC / 24 V DC, základová deska, pojistkové pouzdro na 230 V). Základová deska je uchycena pomocí devíti distančních sloupků M3 o délce 30 mm, takže pod deskou lze vést dráty. Kabelové průchodky jsou velikosti M12 (pro ovladače) a M16 (pro krokový motor a pro přívod 230 V AC). Na víku krabice byly vyvrtány čtyři otvory o průměru 8 mm pro LED diody. Rozmístění komponentů uvnitř krabice je zobrazeno v příloze Q. Zakreslení a umístění komponentů na montážní desku je zobrazeno na fotografiích v příloze R. V příloze S jsou zobrazeny fotografie finální upravené základové stanice.

6 PROGRAM PRO ARDUINO

V této kapitole bude rozebrána filosofie kódu, co kód vlastně „umí“ a pomocí jednoduchých vývojových diagramů bude ukázaná funkce celého kódu a jeho jednotlivých částí.

6.1 Filosofie kódu

Jak již bylo řečeno, systém se skládá ze základové stanice a dvou ovladačů (obrázek č. 19).

Ovladače mají na sobě ovládací prvky, u kterých je nutné sledovat jejich stav a prvky indikační, kde je nutné tyto prvky ovládat. Další indikační prvky jsou umístěné na víku základové stanice. V základové stanici je umístěn driver krokového motoru, který ovládá krokový motor na základě impulsů z Arduino desky. A v poslední řadě šasi krokového motoru obsahují dva mikropínače, které reprezentují dorazy krokového motoru.

Program je sestaven ze dvou přerušení od 16-bitových časovačů. Jedno přerušení slouží pro obsluhu enkodérů na ovladačích (stopa A, B a tlačítko). Toto přerušení se vykonává s periodou 250 us, aby se zachytily všechny pulzy ze stop enkodérů i v případě rychlého otáčení hřídelky enkodéru. Druhé přerušení se vykonává ve dvou různých periodách (40 ms a 5 ms) a slouží pro generování periody krokování a čtení stavů dorazů krokového motoru.

První možností je perioda krokování 5 ms. S touto periodou se vykonává přerušení v případě startu celého systému, kdy krokový motor odkrokuje na dolní doraz („home position“) nebo v případě stisknutí tlačítka stop na aktivním ovladači, kdy uživatel dává příkaz „co nejrychleji sjed’ na dolní doraz“ a tím pádem se co nejrychleji zavře plyn motocyklu.

Druhou možností je perioda krokování 40 ms, což je standardní doba pro krokování, kdy uživatel otáčí enkodérem a na základě počtu překonaných aretovaných poloh enkodéru a aktuální polohy přepínače (rychle/pomalů) dává příkaz o požadavku počtu kroků krokovému motoru.

Dále v programu je funkce *void setup()*, která se vykoná jednou po startu programu a je v ní umístěn kód pro nastavení všech využitých pinů a nastavení obou časovačů.

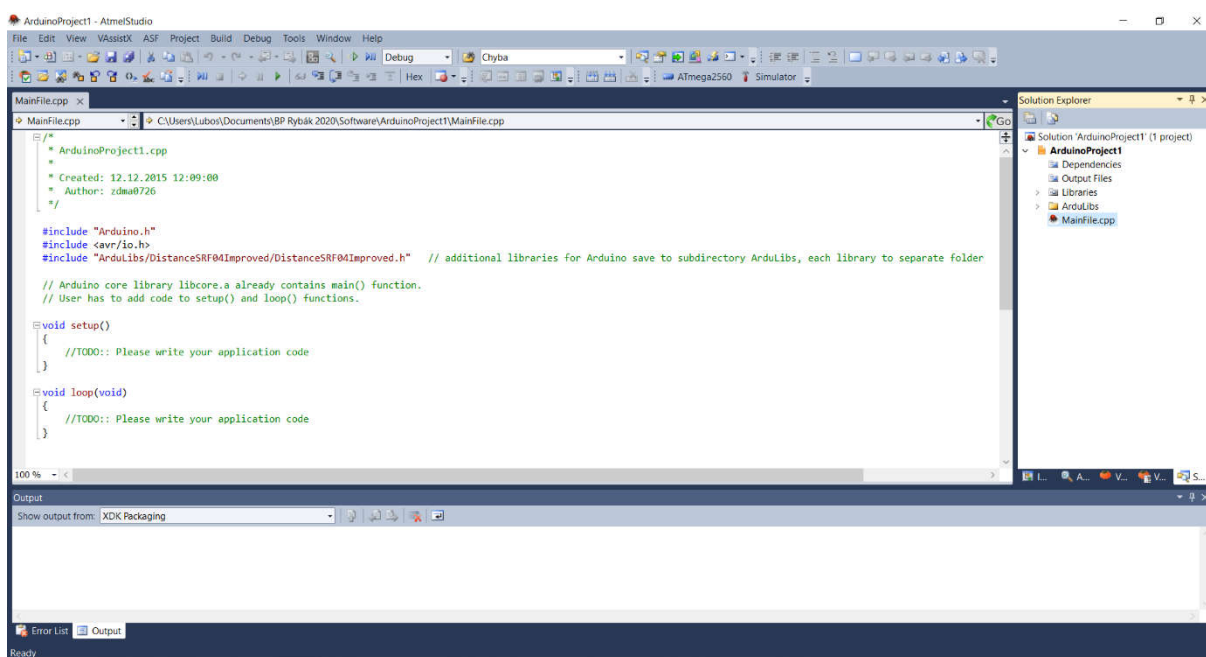
A poslední funkce *void loop()*, která se vykonává periodicky, slouží pro ovládání všech LED diod na základě stavů vstupů, pro vyblikávání chyb a pro čtení stavu tlačítek stop na ovladačích.

Podrobněji je kód rozebrán s obrázky vývojových diagramů v kapitole 6.4 *Popis kódu*.

6.2 Vytvoření projektu v Atmel Studio 6.1 s využitím hlavní knihovny Arduina

Než jsem začal psát kód v prostředí Atmel Studio 6.1 bylo nutné nahrát do prostředí šablonu, která slouží pro založení GCC C++ projektu v Atmel Studio 6.1 s využitím hlavní knihovny Arduina. Tím se vytvoří projekt, ve kterém lze psát programy pro Arduino Mega 2560 v prostředí Atmel Studio 6.1. Nutné je mít verzi Arduina IDE 1.5.6, protože jiný typ verze způsobí nesoulad mezi zdrojovými soubory knihovny v adresáři Arduino IDE a předkompilovanou verzí knihovny, která je obsažena v šabloně.

Šablonu s názvem „GCC C++ Executable with Arduino core library (AVRmega2560) Project.zip“ zkopírujeme do adresáře <Dokumenty>\Atmel studio\Templates\Project Templates. Poté se nám objeví při zakládání nového projektu výběr projektu GCC C++ Arduino Project, který zvolíme a následně se nám vytvoří nový projekt, který vypadá stejně jako v prostředí Arduino IDE (obrázek č. 41).



Obrázek 41 Ukázka vytvořeného projektu GCC C++ Arduino Project

Pro nahrání kódu do Arduino desky se používá AVRdude, který zajistí nahrání programu do desky přes USB stejným způsobem jako to dělá Arduino IDE. Proto je nutné mít nainstalované Arduino IDE 1.5.6. AVRdude se nachází v <Arduino>\hardware\tools\avr\bin\avrdude.exe. Kde <Arduino> je adresář, ve kterém je nainstalováno Arduino IDE. Šablonu, podklady pro nahrání šablony do Atmel Studia 6.1 a postup nahrání programu do Arduino desky jsem získal od svého vedoucího práce Ing. Zdeňka Maška, Ph.D.

6.3 Nahrání knihoven do prostředí

V tomto projektu jsem nahrával do prostředí jednu knihovnu s názvem mechEncoder, která slouží pro obsluhu enkodérů s kvadrurním výstupem (bude blíže popsáno v podkapitole 6.4 Popis kódu).

Pro nahrání knihovny je potřeba nejdříve získat adresář, ve kterém je obsažen zdrojový kód knihovny. Tento adresář se zkopíruje do podadresáře ArduLibs, který se nachází v adresáři projektu <nazev projektu>\<nazev projektu>\ArduLibs. Po zkopírování adresáře knihovny si otevřeme projekt, kde v „Solution Explorer“ (vpravo na obrázku č. 41) najdeme náš zkopírovaný adresář ve složce ArduLibs. Na adresář klikneme pravým tlačítkem myši a vybereme možnost „Include In Project“ a tím se adresář s veškerým svým obsahem přidá do projektu. Když budeme chtít funkce z knihovny používat, je nutné v kódu napsat relativní cestu k hlavičkovému souboru dané knihovny pomocí direktivy *#include*. V mém případě bylo nutné napsat toto: (*#include "ArduLibs/mechEncoder/mechEncoder.h"*) napsáno bez závorek.

6.4 Popis kódu

Kód se skládá z funkce void setup(), která se provede jednou za celou dobu běhu programu, funkce void loop(), která se vykonává pořád dokola během chodu programu. Dále se skládá ještě ze dvou přerušení, u kterých je vykonávání nezávislé na běhu programu. Jedno přerušení je pro obsluhu mechanických enkodérů a sledování stavů ovladačů (aktivní/neaktivní) a druhé přerušení je pro pevnou periodu krokování a sledování stavů mikropřínačů reprezentující dorazy krokového motoru.

V projektu jsou vytvořeny ještě dvě funkce. Kde první funkce má za úkol sledovat stavy ovladačů, zda jsou aktivní nebo ne a zároveň zajišťuje, aby ve stejnou chvíli nebyly připojeny oba ovladače. Druhá funkce zajišťuje vyblikávání chyb pomocí červených LED diod (viz. 3.5 3.5Signalizace chyb).

6.4.1 Použité knihovny

- *#include "Arduino.h"* – hlavní knihovna Arduina (lze využívat funkce pro odpočet času v mikrosekundách od spuštění programu, funkce pro zápis/čtení logické hodnoty na daném pinu)
- *#include "ArduLibs/mechEncoder/mechEncoder.h"* – knihovna pro obsluhu mechanických enkodérů s kvadrurním výstupem. Knihovna eliminuje zákmity mechanických kontaktů enkodérů a neomezuje rychlost otáčení enkodérů. Knihovna byla vytvořena vedoucím této práce.

6.4.2 Začátek kódu

Na začátku kódu jsou vloženy hlavičkové soubory jednotlivých knihoven. Následuje definice všech využitých pinů Arduino desky, kde se přiřazují čísla pinů Arduino desky k direktivám *#define* pro lepší přehlednost kódu.

Následuje vytvoření pole struktur o velikosti dva prvky. Struktura reprezentuje ovládací a indikační prvky jednoho ovladače a proměnné pro uložení minulých stavů vstupů pro zjištění vzestupných a sestupných hran na všech ovládacích prvcích umístěných na daném ovladači.

Poté se inicializují proměnné a konstanty pro odečítání času, pro správné krokování, pro režimy krokování, pro obsluhu enkodérů a pro vyblikávání chyb.

6.4.3 Funkce *void setup()*

V této funkci jsou nejprve nastaveny všechny použité piny Arduina pomocí funkce *pinMode()*, do které se předává číslo pinu a zdali pin je vstupní nebo výstupní.

Poté následuje zkouška funkčnosti všech LED diod tak, že se všechny LED diody na 2 s rozsvítí a poté zhasnou kromě LED diody Zapnuto umístěnou na víku základové stanice. Ta zůstane svítit po celou dobu zapnutého systému.

Dále je nastavení pinů reprezentující vstupy driveru EN-, PUL-, DIR-. Kde EN- je nastaven do úrovně L, takže je driver krokového motoru připraven řídit proud do krokového motoru na základě logických hodnot na svých vstupech. PUL- je nahozen do úrovně H, protože tento vstup dává příkaz pro jeden krok krokovému motoru na základě sestupné hrany na tomto vstupu. DIR- je nastaven též do úrovně H, protože první příkaz je vždy sjetí krokovým motorem na dolní doraz (úroveň H – směr krokování nastaven směrem na dolní doraz).

Na konci této funkce je nastavení dvou 16-bitových časovačů do režimu CTC (Clear Timer on Compare) s přerušením pro odečítání přesné periody vykonávání kódu v daném přerušení. První přerušení je vytvořené pro obsluhu enkodérů a pro sledování stavů ovladačů (aktivní/neaktivní). Toto přerušení se vykonává s periodou 250 us. Druhé přerušení je pro přesnou periodu krokování a pro sledování stavů dvou mikropínačů reprezentující dorazy krokového motoru. Toto přerušení se vykonává každých 40 ms nebo s periodou 5 ms. Za jakých podmínek se mění perioda přerušení je rozebráno v podkapitole 6.4.5 *Přerušení od časovače 16-bit Timer/Counter3*.

6.4.4 Přerušení od časovače 16-bit Timer/Counter 1

Odpovědnost, pro přesnou periodu vykonávání kódu pro obsluhu enkodérů a pro čtení stavu tlačítka na enkodéru na obou ovladačích, je přenesena na 16-bit Timer/Counter1, který

pracuje v režimu CTC. To znamená, že přerušení nastane vždy při dosažení nastavené komparační hodnoty v registru *OCR1A*.

Enkodér generuje dva obdélníkové signály fázově posunuté o 90 °. Experimentálně bylo zjištěno, že časový posun obdélníkových signálů bývá při velmi rychlém otáčení jen 800 us. Tak je nutné stavy stop číst v kratší periodě než 800 ms, aby se zachytily signály z obou stop.

Za tímto účelem byl spuštěn časovač s frekvencí F_{CPU}/N , kde F_{CPU} je taktovací frekvence časovače a N je velikost předděličky. Tělo tohoto přerušení se vykonává s periodou 250 us.

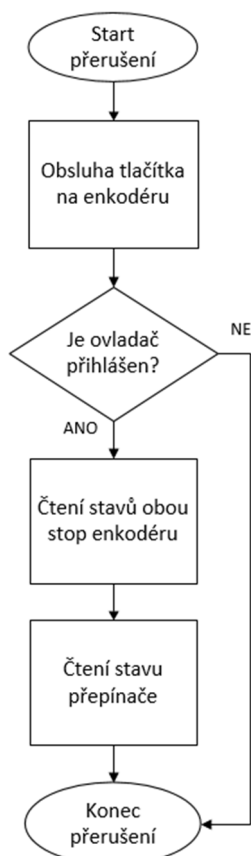
Výpočet komparační hodnoty pro registr *OCR1A* bude:

$$\text{Komparační hodnota} = 0,000250 * \frac{F_{CPU}}{N} - 1 \quad (9)$$

$$\text{Komparační hodnota} = 0,000250 * \frac{16 * 10^6}{8} - 1$$

$$\text{Komparační hodnota} = 499$$

Výsledek vzorce (9) je 499 a tato hodnota je uložena v registru *OCR1A*.



Obrázek 42 Vývojový diagram rutiny přerušení

Na obrázku č. 42 lze vidět zjednodušený vývojový diagram pro kód umístěný v rutině přerušení od časovače *Timer1*.

Celá rutina je v cyklu *for*, kde jedna smyčka představuje obsluhu a čtení stavů vstupů pro jeden ovladač. Takže celkově cyklus obsahuje dvě smyčky. Při detekci vzestupné hrany na tlačítku na enkodéru (stisk tlačítka) se rozsvítí zelená LED dioda na daném ovladači a zelená LED dioda na základové stanici příslušná k danému ovladači. Jestliže ovladač je přihlášen (je aktivní), tak se provede čtení obou stop enkodéru. Pro obsluhu stop enkodéru se používá funkce *mechEncoderRead()*. Tato funkce vyžaduje negativní logiku obou stop enkodéru a navíc vyžaduje, aby logická úroveň stop A a B byla na nejspodnějších dvou bitech (0bxxxxxxBA). Návrátová hodnota této funkce je uložena do příznaku *int8_t krok* a může nabývat třech hodnot (-1 krok zpět, 0 žádný krok, +1 krok dopředu).

Nakonec se přečte stav přepínače, zdali je v poloze rychle nebo pomalu a na základě toho se příznak *krok* vynásobí buď jedničkou (poloha pomalu) nebo desítkou (poloha rychle) a uloží se do proměnné *int16_t krok_cil*. Tato proměnná je vždy

výsledkem této rutiny a vyjadřuje kolik kroků chce uživatel odkrokovat. Jestliže je proměnná záporná, je požadavek na krokování směrem k dolnímu dorazu, v případě kladné hodnoty je požadavek na krokování směrem k hornímu dorazu.

6.4.5 Přerušení od časovače 16-bit Timer/Counter 3

Tento časovač byl vytvořen za účelem generování přesné periody krokování a čtení stavů dorazů krokového motoru. Časovač pracuje ve stejném režimu jako předchozí časovač, a to v CTC režimu, ale tentokrát je komparační hodnota uložena v registru *OCR3A*. Časovač je spuštěn s frekvencí $F_{CPU}/64$. Rutina přerušení se vykonává ve dvou různých periodách.

První možností je perioda krokování 5 ms. S touto periodou se vykonává přerušení v případě prvotního zapnutí celého systému, kdy krokový motor odkrokuje na dolní

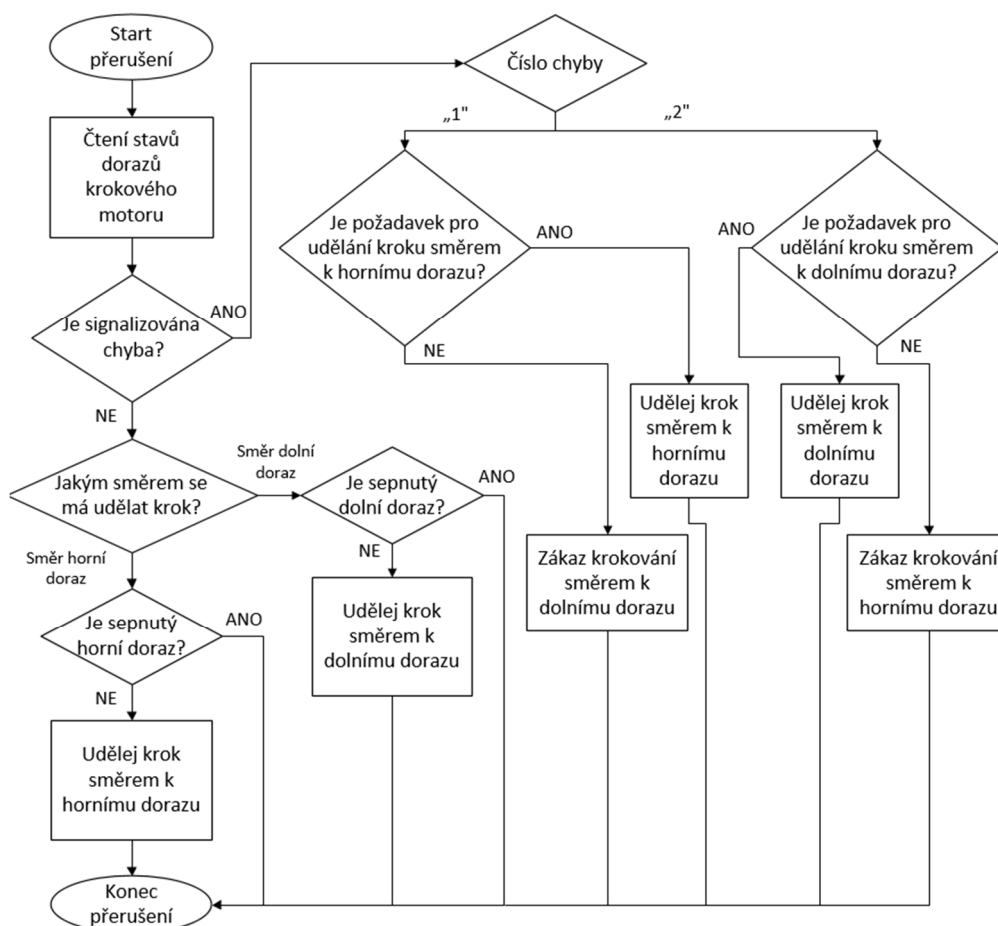
doraz („home position“) nebo v případě stisknutí tlačítka stop na aktivním ovladači, kdy uživatel dává příkaz „co nejrychleji sjeď“ na dolní doraz“ a tím pádem se co nejrychleji zavře plyn motocyklu.

Druhou možností je perioda krokování 40 ms, což je standardní doba pro krokování, kdy uživatel otáčí enkodérem a na základě počtu překonaných aretovaných poloh enkodéru a aktuální polohy přepínače (rychle/pomalů) dává příkaz o požadavku počtu kroků krokovému motoru. obojvý diagram rutiny přerušení pro pevnou periodu krokování

Na obrázku č. 43 je zjednodušený vývojový diagram rutiny pro přesnou periodu krokování a čtení stavů dorazů krokového motoru. Nejdříve se přečtou stavy mikrosypínačů a tím se zjistí, zdali krokový motor je/není na dorazu.

Jestliže je *cislo_chyby* = 0, což znamená, že systém neindikuje žádnou chybu, tak se přistoupí na další podmínku. Za podmínkou „*Jakým směrem se má udělat krok*“ se skrývá skupina *if-else* podmínek, ve kterých se porovnávají dvě proměnné: *krok_cil* a *int16_t pocet_kroku_hotovo*. Hodnota druhé proměnné říká, kolik kroků fyzicky krokový motor odkrokoval a hodnota proměnné *krok_cil* říká na jakou pozici se má krokový motor dostat. Takže rozdíl těchto dvou proměnných je počet zbývajících kroků, které má krokový motor ještě odkrokovat.

Po zjištění směru krokování a zdali je příslušný doraz rozepnut se vykoná tělo *if-else* podmínek, ve kterých je kód pro ovládání vstupů driveru PUL-, DIR-. Na základě logických hodnot na těchto vstupech driver ovládá krokový motor.



Obrázek 43 Vývojový diagram rutiny přerušení pro pevnou periodu krokování

Příkazy „Udělej krok směrem k dolnímu/hornímu dorazu“ se liší pouze v zapsání logické hodnoty do vstupu driveru DIR-.

Pseudokód pro udělení jednoho kroku:

Zapiš log. 1 do DIR-

Počkej 40 us

Zapiš log. 0 do PUL-

Počkej 20 us

Zapiš log. 1 do PUL-

Jestliže je na vstup driveru DIR- zapsaná logická jednička (H) je směr krokování nastaven směrem na dolní doraz. V log. 0 (L) je směr nastaven na horní doraz.

Pauza 40 us je nutná kvůli pomalému optočlenu na vstupu driveru DIR- a rychlému optočlenu na vstupu PUL-. Z toho plyne, že i když se nastaví do určité logické hodnoty dříve DIR- než PUL-, tak reálná změna stavu (bez příkazu *počkej 40 us*) proběhne dříve na PUL- než

na DIR-, takže výsledný směr kroku může být opačný oproti požadovanému! Aby se tak nedělo, je nutná 40 us pauza.

Driver generuje příkaz krokovému motoru pro udělení jednoho kroku, když na vstupu driveru PUL- je sestupná hrana. Proto je na konci pseudokódu PUL- nahozen na úroveň H.

Pauza 20 us je z důvodu konstantní délky signálu PUL-. Význam vstupů driveru PUL- a DIR- je vysvětlen v podkapitole 3.6.2 *Driver krokového motoru*.

V případě, kdy podmínka „*Je signalizována chyba?*“ bude pravdivá, tak podle hodnoty proměnné *cislo_chyby* se uskuteční vykonání jednoho z „*casů*“. Když se vyskytne jedna ze dvou možných chyb, tak se rozblíkají červené LED a dle počtu bliknutí lze rozeznat o jakou chybu se jedná (viz 3.5 *Signalizace chyb*).

V případě, že nebude sepnut dolní doraz po odkrokování maximálního počtu kroků, který lze udělat na maximálním rozsahu krokového motoru, tak nebude umožněno dalšího kroku směrem k dolnímu dorazu do té doby, dokud nebude udělán alespoň jeden krok směrem k hornímu dorazu. Poté se povolí krokování oběma směry tzn. že uživateli je povoleno krokovat směrem k vadnému dolnímu dorazu až do opětovného rozpoznání chybějícího signálu dolního dorazu. Obdobně platí pro vadný horní doraz.

6.4.6 Funkce *void loop()*

Po zapnutí napájení (nebo resetu Arduina) krokový motor sjede na dolní doraz s periodou krokování 5 ms („home position“). Nastavení periody krokování se provádí v této funkci a samotné kroky dělá přerušení od časovače *Timer3*. Během krokování na dolní doraz je zakázáno přerušení při komparaci od časovače *Timer1*, takže uživatel nemůže pomocí ovladačů zasahovat do krokování. Až krokový motor sjede na dolní doraz, změní se perioda krokování na 40 ms a povolí se přerušení od časovače *Timer1* a tím se zpřístupní ovládací prvky na ovladači.

Funkce *loop()* zajišťuje volání funkce *Blikani_LED* a předává této funkci jeden parametr reprezentující číslo chyby v případě, kdy krokový motor fyzicky odkrokoval maximální počet kroků jedním směrem z aktuální pozice, a přesto nedošlo k sepnutí žádného dorazu (viz 3.5 *Signalizace chyb*). Funkce *Blikani_LED* poté zajišťuje vyblikávání chyb dle tabulky č. 3.

Funkce *loop()* také ovládá červené LED diody v případě najetí na doraz krokového motoru tak, že příslušnou LED rozsvítí po celou dobu setrvání krokového motoru na jednom z dorazů.

Ve funkci *loop* se sleduje stav tlačítka STOP na přihlášeném ovladači. V případě zjištění vzestupné hrany na tlačítku stop (tlačítko bylo stisknuto) krokový motor okamžitě odkrokuje s periodou krokování 5 ms na dolní doraz (zavře plyn motocyklu). Během krokování na dolní doraz, program nereaguje na stavy ovládacích prvků na aktivním ovladači. Až krokový motor sjede na dolní doraz, změní se perioda krokování na 40 ms a zpřístupní se ovládací prvky na ovladači.

7 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Po úspěšném návrhu celého systému, úpravy krabičky a osazení všech DPS a naprogramování Arduino desky jsem se uchýlil k ověření funkčnosti. V této kapitole budou ukázány hodnoty naměřené pomocí multimetru a poté budou ukázány oscilogramy a popis průběhů na nich zobrazený.

Měřil jsem zvlnění napětí, funkci krokování, funkci rotačních enkodérů, funkci tvarovače 74HC14 a RC článku na výstupech rotačních enkodérů, a nakonec byla provedena oteplovací zkouška zavřené krabice a krokového motoru při dvou různých stádiích pracovního cyklu a reálná spotřeba celého systému elektronického plynu.

Při měření jsem využíval přístroje uvedené níže v tabulce č. 22.

Tabulka 22 Seznam použitých měřících přístrojů

Měřicí přístroj	Typ měřícího přístroje
Stolní digitální multimetr	KEYSIGHT 34465A
Osciloskop	RIGOL MSO1074, 4kanály, 70MHz, 1GSa/s
Proudové kleště	FLUKE i30s, max 20 A RMS, přepočet 100 mV / A
Klešťový multimetr	PROVA CM-02, max. průměr měřeného vodiče je 23 mm
Měřič výkonu	PM333-F40811, 230 V / 50 Hz, max 10 A / 2300 W
Termokamera	FLUKE TiS20, rozlišení: 120 x 90 teplotních bodů, přesnost měření ± 2 °C
Multimetr jako teplotní sonda	UNI-T UT195M + K termočlánek, přesnost měření teploty: ± 4 °C

7.1 Měření multimetrem

Pomocí stolního multimetru KEYSIGHT 34465A jsem změřil následující hodnoty uvedené níže v tabulce č. 23.

Tabulka 23 Hodnoty změřené pomocí multimetru

Měřená veličina	Změřená hodnota
Výstupní napětí na zdroji Meanwell	24,07 V
Výstupní napětí na snižovacím měniči LM2596	5,02 V
Napájecí napětí na vstupech driveru EN+, PUL+, DIR+	4,56 V
Střední hodnota proudu odebíraného driverem krokového motoru (PUL-, DIR-)	18,6 mA

Změřená hodnota při měření napětí na vstupech driveru je nižší než 5 V, z důvodu celkem velkého úbytku napětí na F 100 mA pojistce (ve schématu označena jako POJ2), která chrání vstupy driveru proti proudovému přetížení. Změřená hodnota je stále v toleranci pro úroveň H, protože oblast pro úroveň H je od 3 V do 5 V.

Jak již bylo zmíněno na vstupech driveru jsou optočleny s obvodem pro omezení proudu na 20 mA. Obvody pro omezení proudu fungují správně, jelikož střední hodnota proudu na vstupech driveru DIR- a PUL- je 18,6 mA.

7.2 Zvlnění napětí

Pomocí čtyř kanálového digitálního osciloskopu v režimu AC jsem změřil zvlnění napětí na těchto místech:

- Na výstupu 24 V spínaného zdroje, když se nekrokuje a když se krokuje (CH1).
- Na přívodu 24 V do DC-DC měniče LM2596 na základové desce (CH2).
- Na výstupu 5 V z DC-DC měniče LM2596 na základové desce (CH3).
- 5 V za LC filtrem na výstupu DC-DC měniče LM2596 na základové desce (5 V rozvod na základové desce) (CH4).

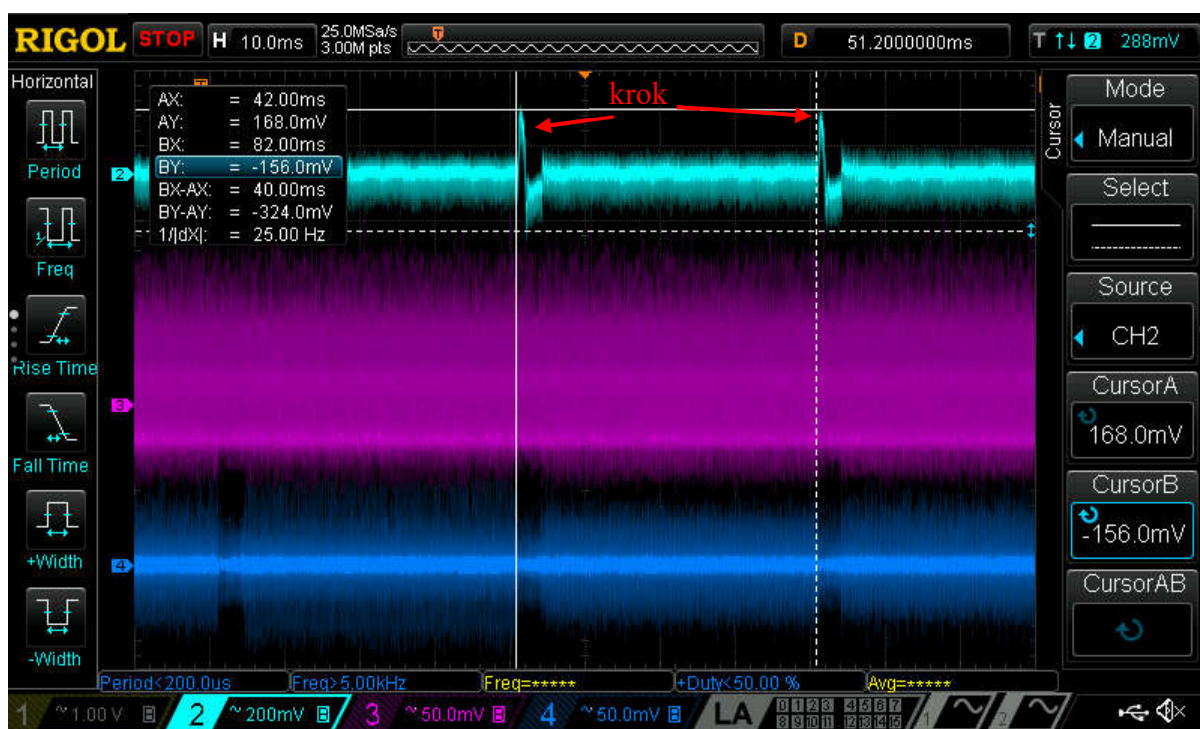
Označení průběhu platí pro obrázky č. 44, č. 45 a č. 46.



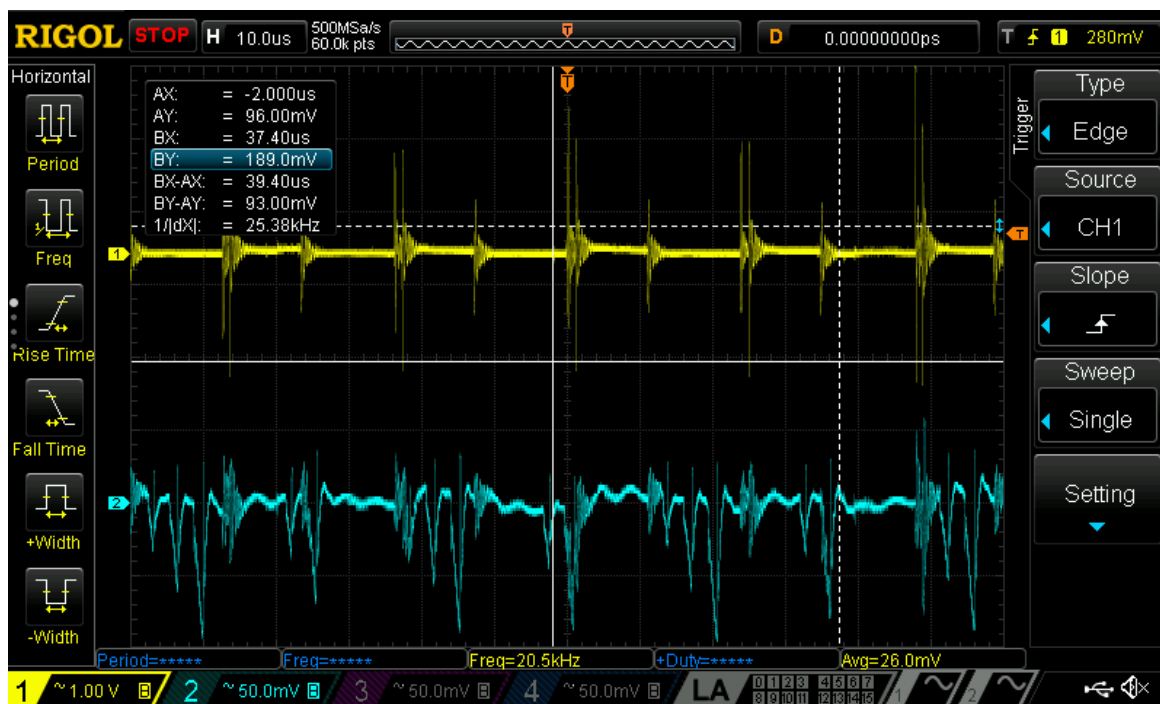
Obrázek 44 Průběh zvlnění napětí, když se nekrokuje

Výše na obrázku lze vidět detail průběhů napětí, přičemž zvlnění na vstupu a výstupu snižujícího měniče 24 V DC / 5 V DC je přibližně stejné a má hodnotu 154 mV Pk-Pk. LC filtr na výstupu snižujícího měniče částečně vyfiltruje napětí a zmenší zvlnění přibližně 80 mV Pk-Pk.

Při krokování se zvlnění napětí na vstupu a výstupu snižujícího měniče zvýší na 324 mV Pk-Pk (vodorovné kurzory na obrázku č. 45) a zvlnění napětí na 5 V rozvodu po základové desce se sníží na 60 mV Pk-Pk. V tomto případě je LC filtr účinnější. Krokování probíhá s přesnou pevnou periodou 40 ms.



Obrázek 45 Průběh zvlnění napětí při krokování



Obrázek 46 Průběh zvlnění napětí, když se nekrokuje

Na obrázku č. 46 je průběh zvlnění napětí na výstupu spínaného zdroje 230 V / 24 V (CH1) a na vstupu 24 V snižujícího měniče 24 V DC / 5 V DC (CH2), když se nekrokuje. Maximální zvlnění průběhu CH1 je 4 V a zvlnění průběhu CH2 je stejné jako na obrázku č. 44 (154 mV Pk-Pk).

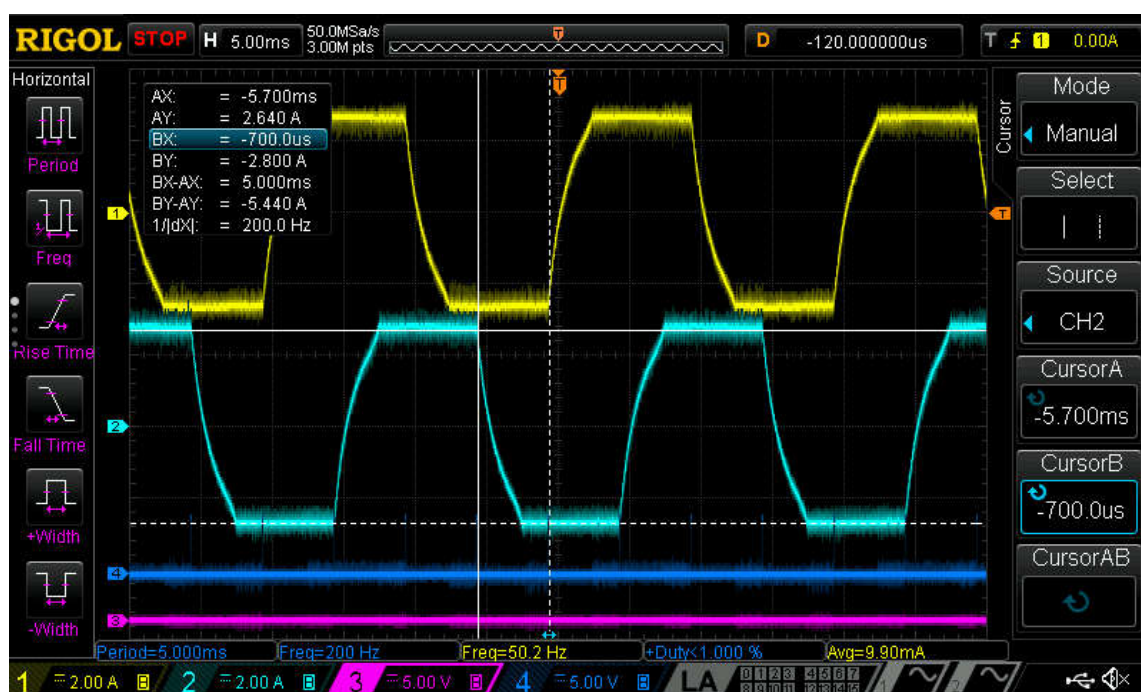
Při krokování je zvlnění napětí na výstupu spínaného zdroje Meanwell 4,5 V, a zvlnění napětí na vstupu snižujícího měniče 24 V DC / 5 V DC se zvýší na 324 mV Pk-Pk.

7.3 Funkce krokování

Funkce krokování byla ověřena pomocí čtyř měření. Prvními dvěma měřeními je testována funkčnost krokování v tomto projektu. Dalšími dvěma měřeními je testována funkčnost krokování za předpokladu, že nastavená perioda krokování bude 240 ms.

V prvním měření byly změřeny tyto průběhy:

- Proud do (svorka A- na driveru) 1. fáze motoru (CH1).
- Proud do (svorka B- na driveru) 2. fáze motoru (CH2).
- Signál směru na svorce DIR- na driveru (CH3).
- Signál krokování na svorce PUL- na driveru (CH4).



Obrázek 47 Funkce krokování při stisku tlačítka stop na jednom z ovladačů

Výše na obrázku svislými bílými kurzory je vyznačena perioda krokování (5 ms). Jelikož délka pulsu PUL- je pouhých 20 us není na obrázku pulz téměř vidět. Driver krokového motoru byl při tomto měření nastaven na výstupní fázový proud 1,8 A a řízení s celým krokem (nastavení přepínačů: OFF – OFF – ON – OFF – ON – ON). Toto nastavení driveru je z důvodu použití tohoto nastavení i při oteplovací zkoušce celého zařízení.

Změřený fázový proud má max. velikost cca 2,7 A a perioda průběhu proudu obou fází je 20 ms. Směr krokování je nastaven směrem na dolní doraz, takže vstup DIR- je v úrovni L.

Ve druhém měření pro ověření funkce krokování byly změřeny tyto průběhy:

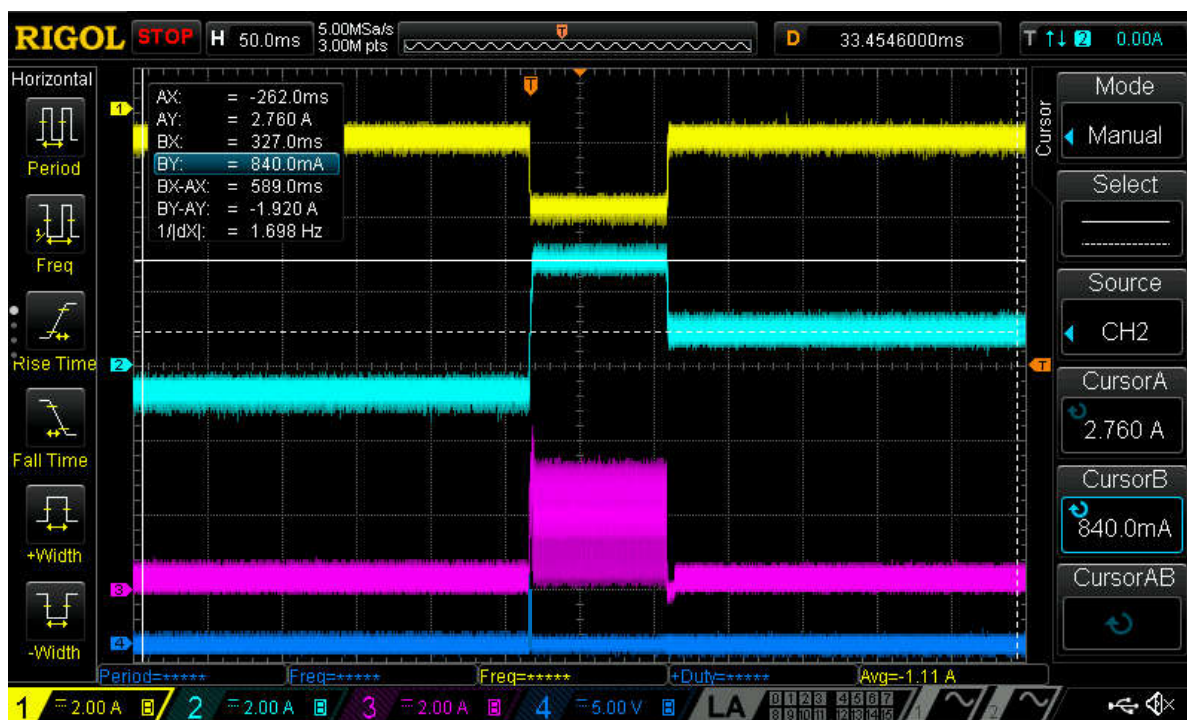
- Proud do (svorka A- na driveru) 1. fáze motoru (CH1).
- Proud do (svorka B- na driveru) 2. fáze motoru (CH2).
- Proud odebíraný driverem (svorka DC+) (CH3).
- Signál krokování na svorce PUL- na driveru krokového motoru. (CH4).



Obrázek 48 Odběr ze spínaného zdroje při krokování

Na obrázku č. 48 je ukázaná funkce krokování s průběhem proudu odebíraným driverem. Driver krokového motoru odebírá špičkově 4,48 A, což je o 2 A více, než jsem naměřil před výběrem spínaného zdroje Meanwell. Driver je totiž upraven, aby se původní krátká doba zvýšení proudu prodloužila na 100 ms. To bylo nutné kvůli dlouhé periodě krokování 40 ms, jinak by totiž driver neutáhl plynové lanko motocyklu.

Kanál CH4 je signál PUL- a při vzestupné hraně tohoto signálu (respektive při sestupné hraně signálu PUL+) se generuje povel pro udělení jednoho kroku. Povel se generuje každých 5 ms, protože bylo stisknuto tlačítko stop na ovladači, které dává povel „sjed’ rychle na dolní doraz“.

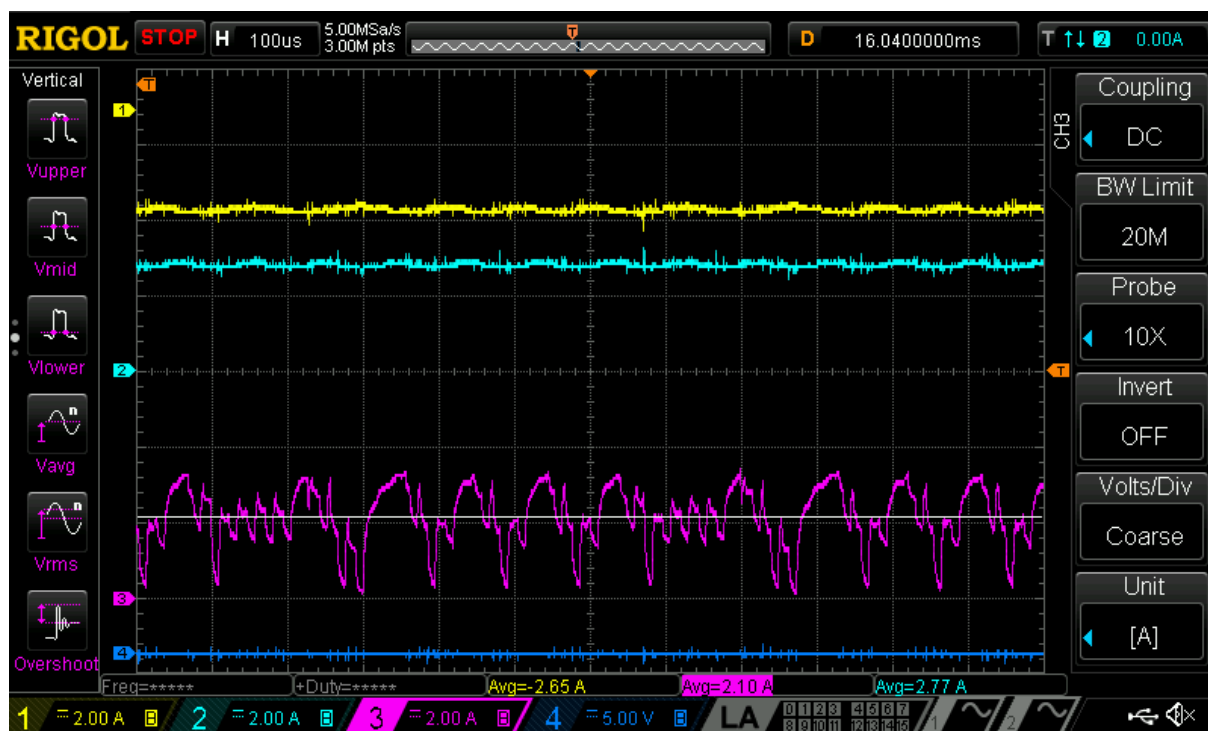


Obrázek 49 Funkce krokování při nastavení periody krokování větší než 100 ms

- CH1(žlutý) – proud do svorky B- na driveru.
- CH2 (světle modrý) – proud do svorky A- na driveru.
- CH3 (růžový) – proud do svorky DC+ na driveru (napájení driveru).
- CH4 (tmavě modrý) – napětí na svorce PUL- na driveru.

Když otočíme enkodérem o jeden krok doprava a v kódu zajistíme periodu krokování větší než 100 ms (v tomto případě byla perioda nastavena na 240 ms), tak dostaneme průběh, který je zobrazen na obrázku č. 49. Kde vzestupnou hranou na svorce PUL- se generuje povel pro udělení kroku. Tím vzroste proud do fází motoru na 100 % a po 100 ms tento proud klesne na přibližně 30 % své hodnoty. V tomto projektu je perioda krokování nastavena na 40 ms, takže fázový proud neklesá na 30 % své hodnoty během krokování, aby krokový motor utáhl plynové lanko motocyklu.

Maximální proud odebíraný driverem krokového motoru je 4,1 A.



Obrázek 50 Detail fázových proudů na úrovni 100 %

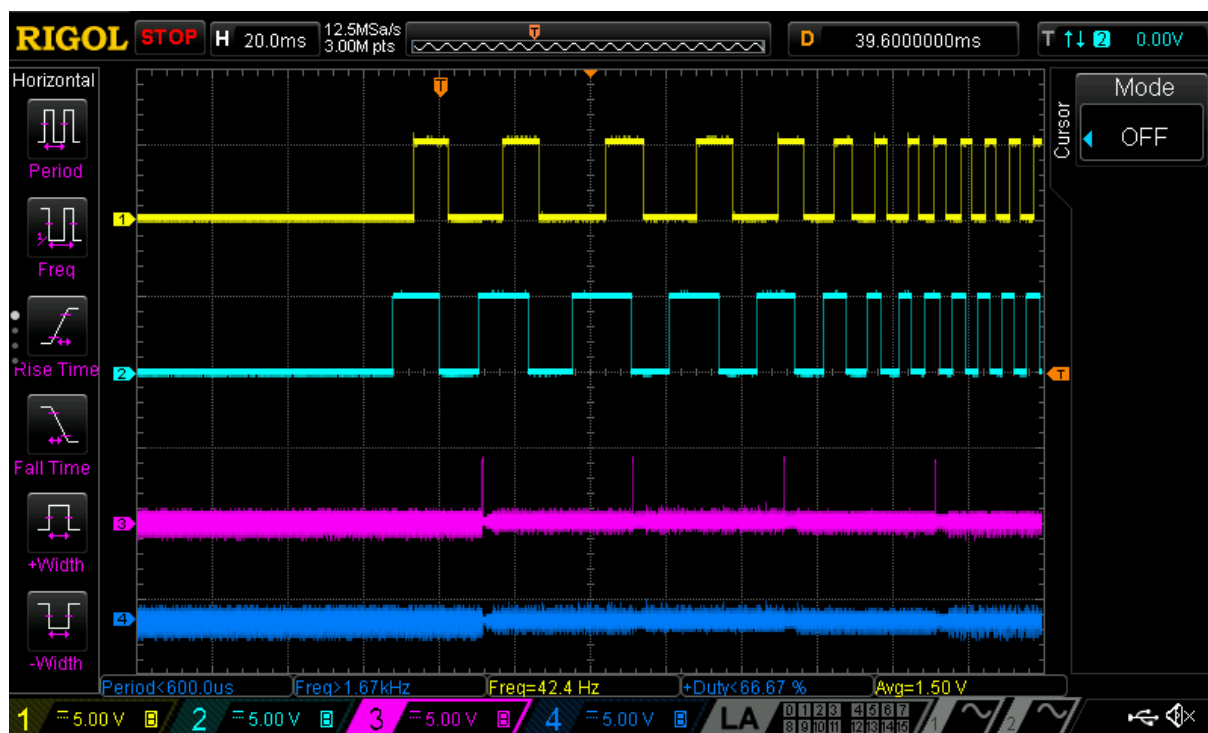
- CH1(žlutý) – proud do svorky B- na driveru.
- CH2 (světle modrý) – proud do svorky A- na driveru.
- CH3 (růžový) – proud do svorky DC+ na driveru (napájení driveru).
- CH4 (tmavě modrý) – napětí na svorce PUL- na driveru.

Na obrázku č. 50 je detail průběhu krokování z obrázku č. 49, kdy proudy fází motoru dosahují 100 %. Střední hodnota proudu odebíraného driverem krokového motoru je 2,1 A. Střední hodnota proudu do fází motoru je 2,65 A a 2,77 A.

Při ustáleném stavu tzn. že fázové proudy jsou na úrovni 30 % je střední hodnota proudu odebíraného driverem 186 mA a střední hodnoty do fází motoru jsou -883 mA a -773 mA.

7.4 Funkce mechanických rotačních enkodérů

Při ověřování této funkce bylo nutné sledovat průběhy stop enkodérů a vstupy driveru krokového motoru PUL- a DIR-.



Obrázek 51 Funkce krokování na základě průběhů stop enkodéru na ovladači 2

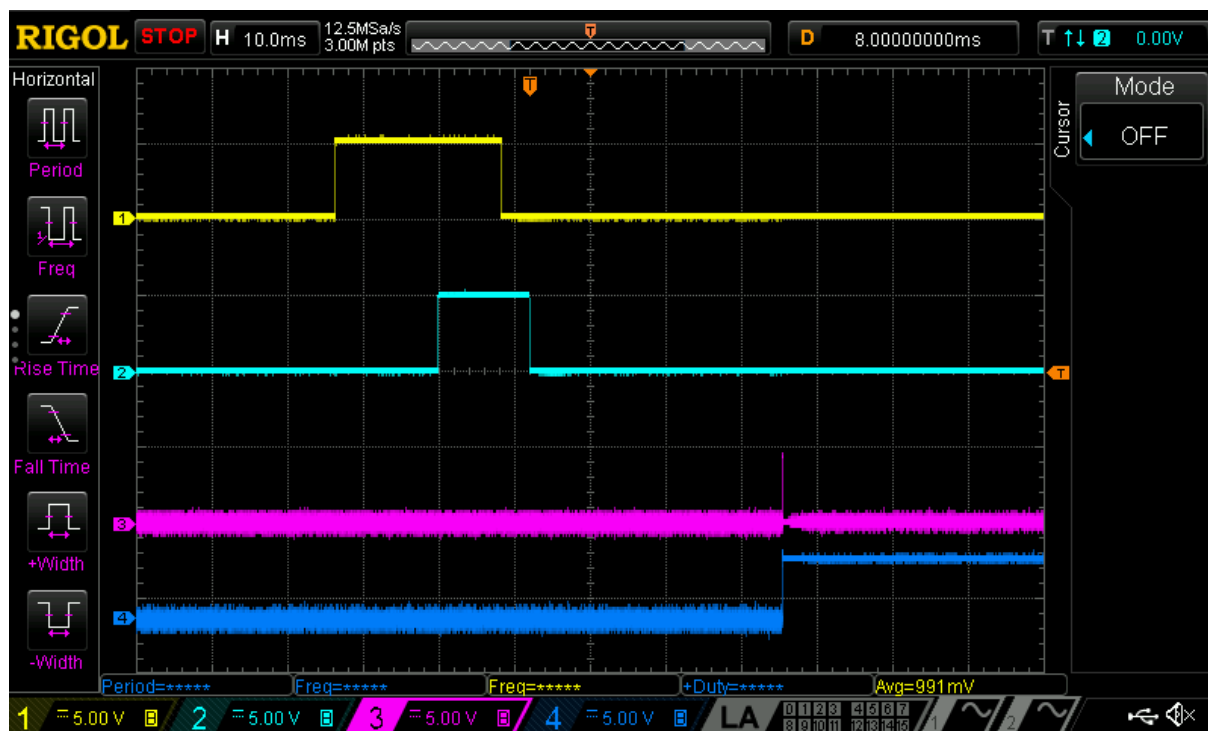
Popis průběhu:

- CH1 (žlutý) – Signál stopy A enkodéru měřený na výstupu z tvarovače 74HC14.
- CH2 (světle modrý) – Signál stopy B enkodéru měřený na výstupu z tvarovače 74HC14.
- CH3 (ružový) – Signál krokování na svorce PUL- na driveru krokového motoru.
- CH4 (tmavě modrý) – Signál směru na svorce DIR- na driveru krokového motoru.

Oscilogram na obrázku č. 51 vznikl otočením enkodéru na ovladači 2. Lze vidět, že rychlým otáčením enkodéru se nezmenší perioda krokování motoru, která je pořád konstantní (40 ms). Jelikož signál DIR- je v úrovni L a stopa B předbíhá stopu A, tak se enkodérem otáčelo po směru hodinových ručiček. Dle počtu pulsů obou stop enkodéru na časovém úseku lze vyčíst, že rychlost otáčení enkodéru uživatelem byla přibližně 3,6 ot/s.

Maximální počet kroků, po kterém může krokový motor krokovat je 211 a na jednu celou otočku enkodéru se musí překonat 24 aretovaných poloh. Při nastavení přepínače do

polohy pomalu, kde jeden krok enkodéru znamená jeden krok pro krokový motor, musí uživatel udělat téměř 9 celých otoček, aby krokový motor odkrokoval z jednoho dorazu na druhý.

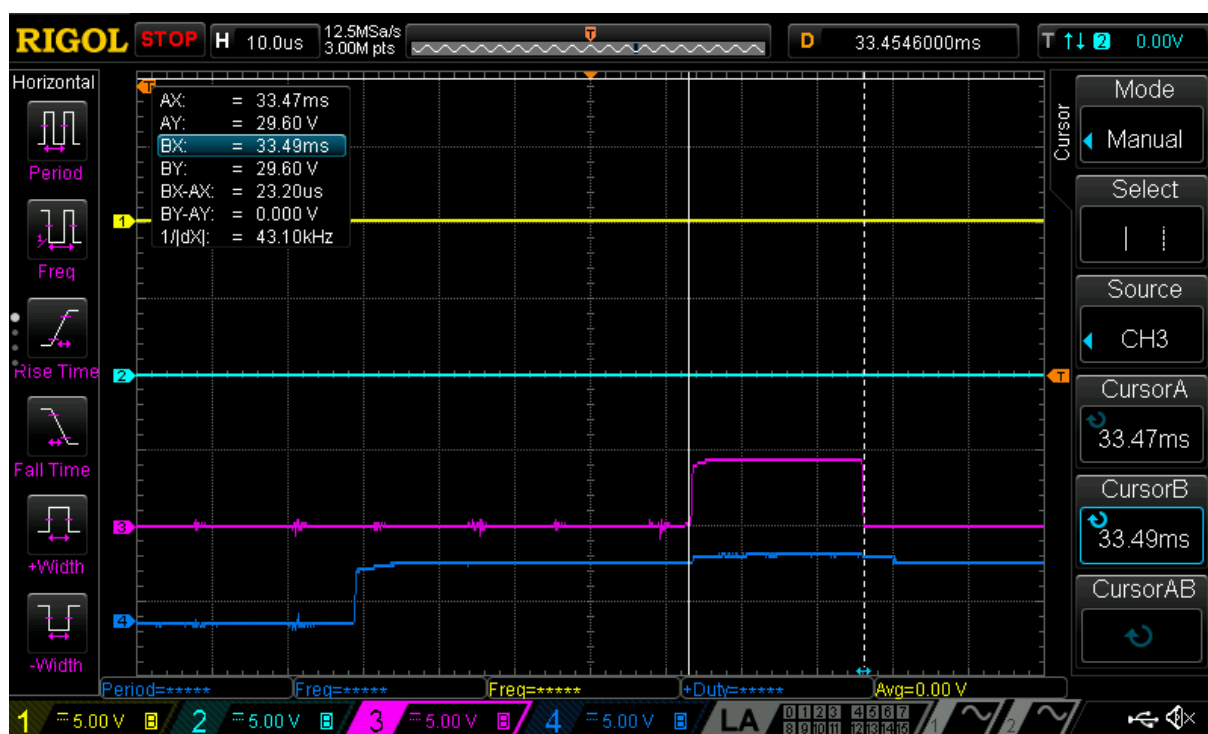


Obrázek 52 Ukázka udělení jednoho kroku na enkodéru

Popis průběhu:

- CH1 (žlutý) – Signál stopy A enkodéru měřený na výstupu z tvarovače 74HC14.
- CH2 (světle modrý) – Signál stopy B enkodéru měřený na výstupu z tvarovače 74HC14.
- CH3 (ružový) – Signál krokování na svorce PUL- na driveru krokového motoru.
- CH4 (tmavě modrý) – Signál směru na svorce DIR- na driveru krokového motoru.

Tentokrát se překonala jedna aretovaná poloha enkodéru směrem proti hodinovým ručičkám. Přibližně 30 ms trvala doba mezi otočením enkodéru a povel pro udělení jednoho kroku. Zpoždění reakce krokového motoru na povel z enkodéru je max 40 ms, což je dáno pevnou periodou krokování, která je v programu nastavena na 40 ms.



Obrázek 53 Detail průběhu zobrazeného na obrázku č. 52

Popis průběhu:

- CH1 (žlutý) – Signál stopy A enkodéru měřený na pinu DT na svorkovnici.
- CH2 (světle modrý) – Signál stopy B enkodéru měřený na pinu CLK na svorkovnici.
- CH3 (ružový) – Signál krokování na svorce PUL- na driveru krokového motoru.
- CH4 (tmavě modrý) – Signál směru na svorce DIR- na driveru krokového motoru.

Délka pulzu PUL- (CH3) je v programu nastavena na 20 us a při změření reálného průběhu je délka pulzu o 3,2 us delší. Prodleva je způsobena optočlenem na vstupu PUL- a doba trvání použité funkce v programu pro zapsání logické hodnoty na pin PUL-.

Časová prodleva mezi nahozením signálu DIR- a PUL- do logické jedničky je přibližně 44 us. V programu je prodleva nastavena na 40 us. Důvod „zpoždění“ je stejný jako u délky pulzu PUL-.

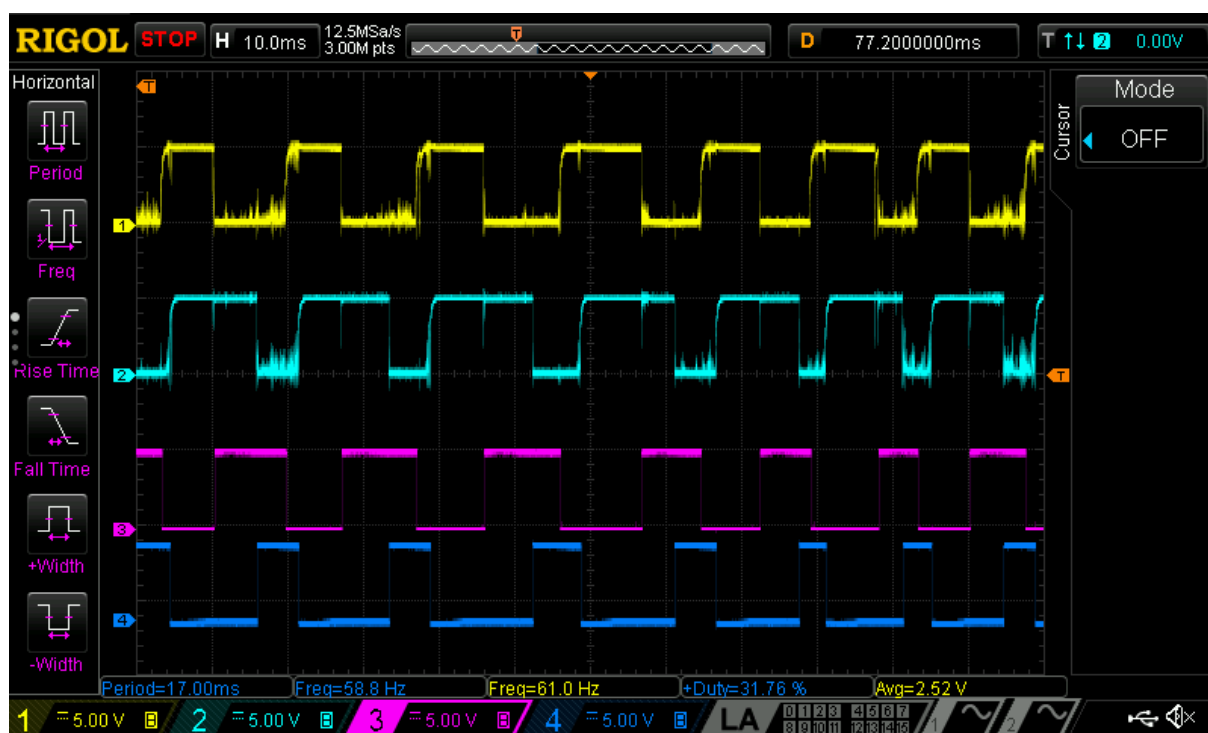
Změřené délky pulzů a časový posun mezi nimi je správný a odpovídá kódu.

Průběhy na obrázcích č. 51 – č. 53 jsou totožné s průběhy stop enkodéru na ovladači 1, takže nebudou v této práci ukázány.

7.5 Funkce tvarovače 74HC14

Jedná se o součástku v pouzdru DIL 14. Toto pouzdro obsahuje 6x inverter se Schmittovým vstupem, který má za úkol vytvarovat signál z mechanického rotačního enkodéru na čistý obdélníkový signál.

Funkce tvarovače je ukázána na ovladači 1. U ovladače 2 jsou průběhy identické se stejným významem, takže v této práci nebudou rozebírány.



Obrázek 54 Funkce tvarovače 74HC14

Popis průběhů:

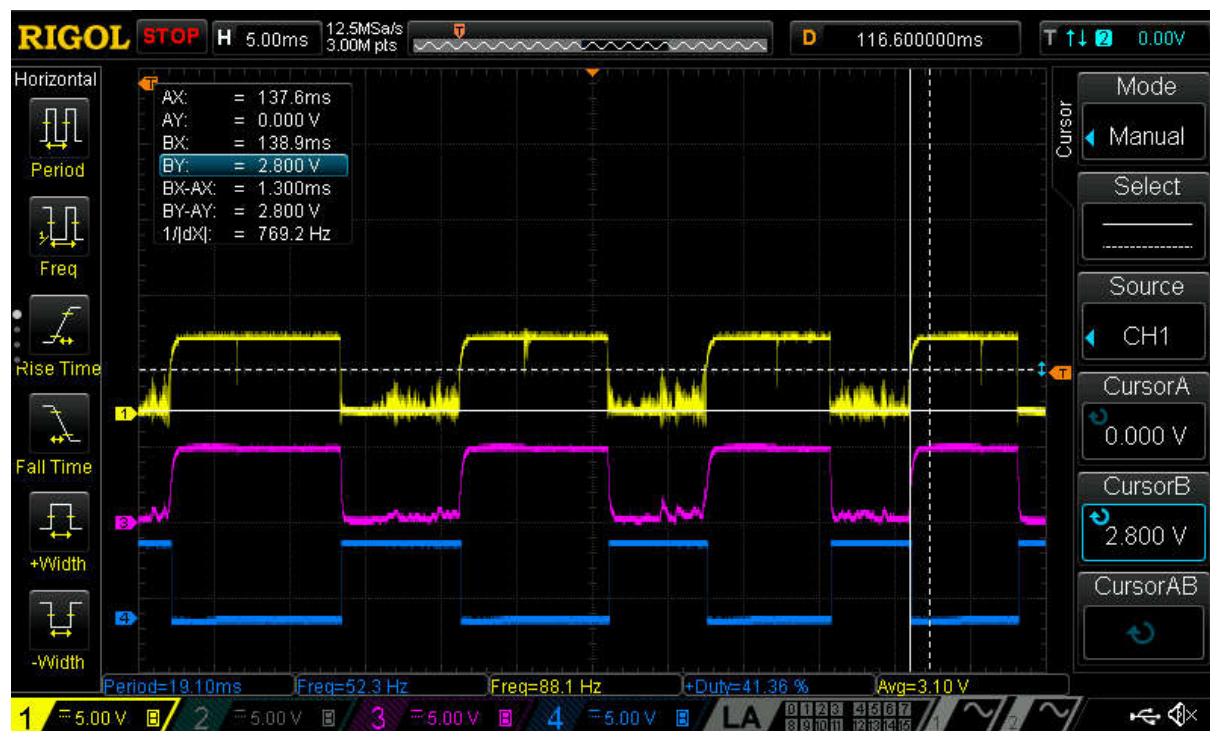
- CH1 (žlutý) – Signál stopy A enkodéru měřený na pinu DT na svorkovnici.
- CH2 (světle modrý) – Signál stopy B enkodéru měřený na pinu CLK na svorkovnici.
- CH3 (růžový) – Signál DT na výstupu tvarovače 74HC14.
- CH4 (tmavě modrý) – Signál CLK na výstupu tvarovače 74HC14.

Dle průběhu signálu na kanálu CH1 a CH2 na obrázku č. 54 lze zjistit, že enkodérem bylo točeno směrem proti hodinovým ručičkám a rychlost otáčení byla přibližně 2,8 ot/s. Na těchto průbězích je ke všimnutí zakmitávání mechanických kontaktů na enkodéru, které při vysoké rychlosti otáčení nejsou vůbec nezanedbatelné. V tomto případě amplitudy zákmitů dosáhly až 2,3 V. Jestliže amplituda zákmitu kontaktů dosáhne 3 V a více, tak na výstupu

tvorovače se objeví logická jednička a do Arduino desky přijde informace o kroku na enkodéru, který nebyl reálně vykonán.

7.6 Zpracování signálu od enkodéru

Signál od enkodérů umístěných na ovladačích prochází postupnou filtrací signálu. Nejprve signál vyfiltruje RC člunek a následně signál vytvaruje tvarovač 74HC14.



Obrázek 55 Zpracování signálu od enkodéru

Popis průběhů:

- CH1 (žlutý) - Signál stopy A enkodéru měřený na pinu DT na svorkovnici.
- CH3 (růžový) - Signál DT měřený za RC článkem.
- CH4 (modrý) – Signál DT na výstupu tvarovače 74HC14.

Z obrázku č. 55 je vidět postupné zpracovávání signálu od enkodéru. Bez filtrace dosahují zákmity mechanických kontaktů enkodéru až hodnoty 2,8 V. Za RC článkem tyto zákmity dosahují jen 1,5 V. Při této velikosti zákmitů bude tvarovač pracovat správně a do Arduino desky se dostanou signály kroků od enkodéru, které byly opravdu vykonány.

7.7 Oteplovací zkouška

Oteplovací zkouška byla prováděna termokamerou a teplotní sondou od multimetru. Typy přístrojů jsou uvedeny v tabulce č. 22.

Byly provedeny dvě oteplovací zkoušky, které se liší pracovním cyklem chodu krokového motoru. Při měření byla vždy použita černá páska pro zajištění správné emisivity a tím co nejpřesnějšího změření teploty.

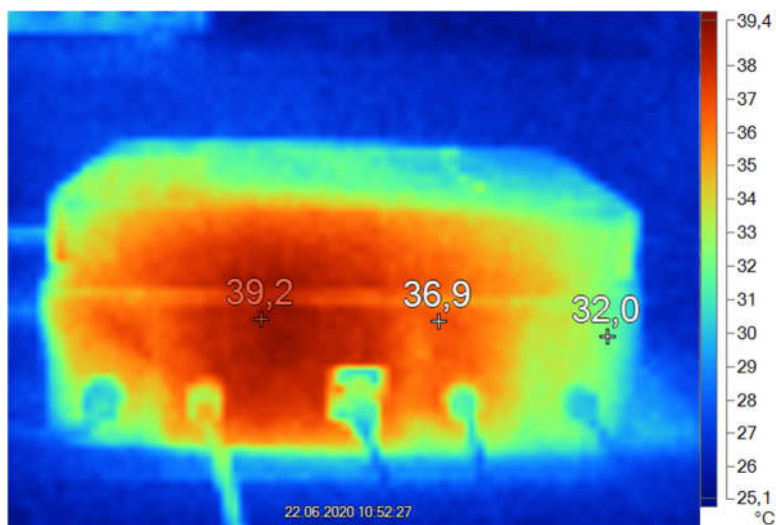
Při měření obou pracovních cyklů byl driver krokového motoru nastaven na fázový proud 1,8 A a řízení s celým krokem. Každou fází krokového motoru reálně protékal špičkový proud 2,7 A (jmenovitý proud krokového motoru je 2,3 A). Nastavení přepínačů na DIP panelu driveru bylo (od SW1 k SW6): OFF-OFF-ON a OFF-ON-ON. Perioda krokování při měření oteplení byla v obou případech 40 ms. V obou případech nebyl krokový motor zatížen plynovým lankem.

7.7.1 Pracovní cyklus krokového motoru 100 %

Při pracovním cyklu 100 % krokový motor neustále bez přestání krokoval s periodou krokování 40 ms od dorazu k dorazu. Tento způsob provozu krokového motoru je extrémní a v praxi nebude krokový motor takto provozován. Měření proběhlo jako první a hodnoty teploty byly odečteny po jedné hodině chodu krokového motoru.

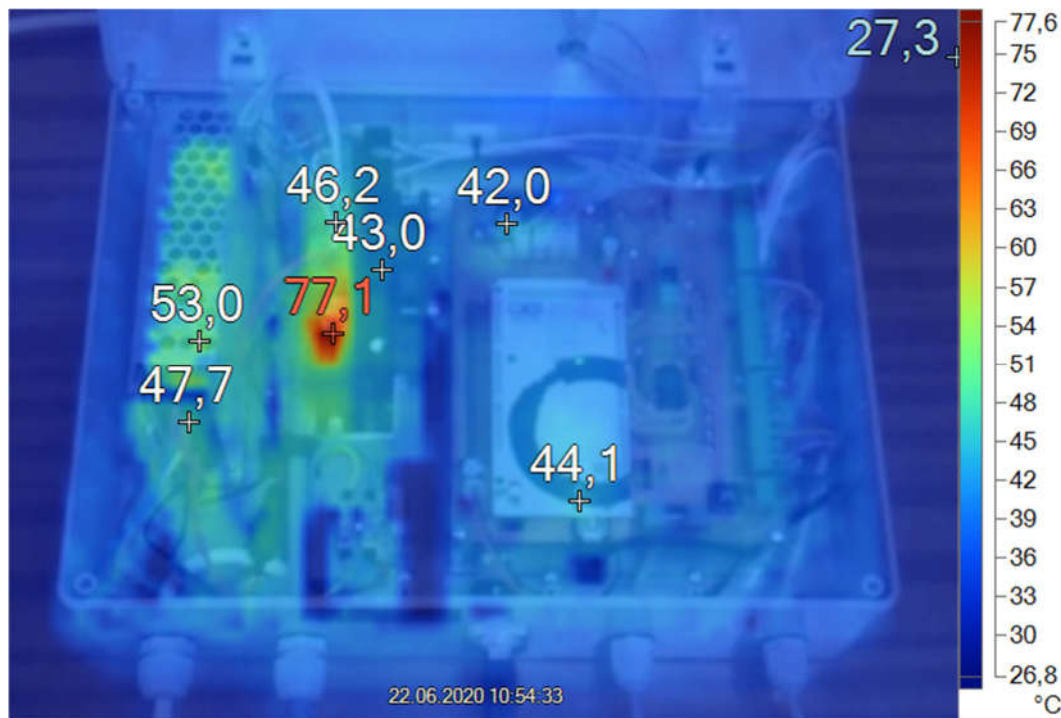
Při tomto pracovním cyklu byl špičkový odběr proudu driveru ze zdroje Meanwell 2,2 A a odběr celého zařízení ze sítě 230 V AC byl 63 W s účínkem 0,64.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny snímky z termokamery. Hodnoty byly snímány uvnitř základové stanice, na stěnách základové stanice, na krokovém motoru a na kabelu LiYCY 8x0,34 vedoucí ke krokovému motoru.



Obrázek 56 IR snímek uzavřené základové stanice (z pohledu na výstupy)

Na obrázku č. 56 je snímek základové stanice pořízen termokamerou. Nejvyšší teplota byla zaznamenána právě z tohoto pohledu a činila 39,2 °C. Na místě s nejvyšší naměřenou teplotou za stěnou uvnitř základové stanice je driver krokového motoru a spínaný zdroj 230 V AC / 24 V DC. Směrem doprava na obrázku č. 56 teplota klesá až na 32 °C.



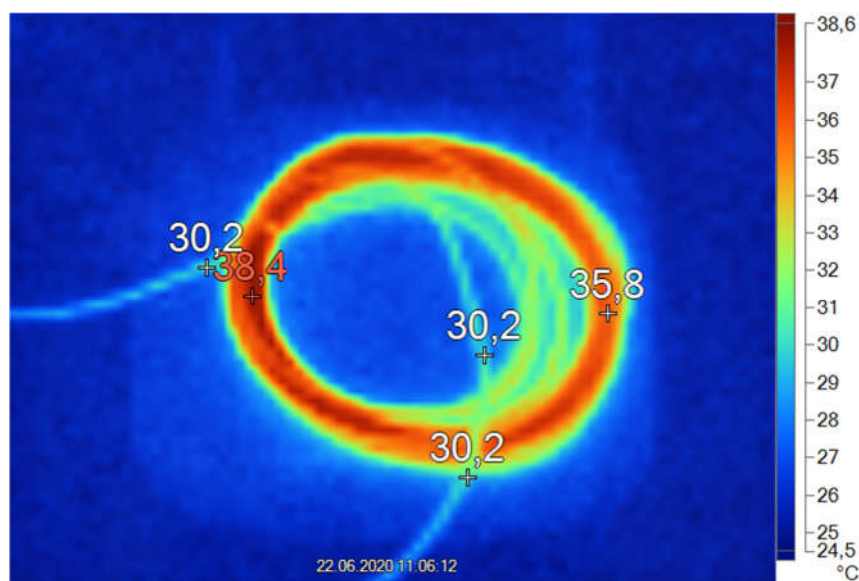
Obrázek 57 Teplota zaznamenaná uvnitř základové stanice (pracovní cyklus 100 %)

Snímek na obrázku č. 57 byl pořízen ihned po otevření základové stanice a je jasné vidět, že ohnisko nejvyšší teploty uvnitř krabice je na DIP panelu na driveru krokového motoru (naměřená maximální teplota byla 81 °C). Důvodem je vyříznutý otvor v plastovém krytu okolo DIP panelu, kterým uniká teplý vzduch ven z driveru.

Teplota chladiče driveru je 43 °C, takže ventilátor umístěný na chladiči plní svoji funkci. Teplota svorkovnice na driveru se pohybovala od 43 °C a zvyšovala se směrem k vyříznutému otvoru na driveru až k 55 °C.

Druhé ohnisko vysoké teploty uniká ze spínaného zdroje Meanwell (až 60 °C při bližším pohledu) a na svorkovnici tohoto zdroje byla naměřená nejvyšší teplota téměř 48 °C.

Nejteplejší místo na základové desce bylo zaznamenáno u USB konektoru na Arduino desce a na snižujícím DC-DC měniči s LM2596 (viz obrázek č. 57).



Obrázek 58 IR snímek kabelu LiYCY 8 x 0,34 vedoucí ke krokovému motoru

Kabel o délce 8 m ke krokovému motoru byl při měření smotaný do klubka a stažen stahovací páskou. Právě blízko stahovací pásky byla naměřená nejvyšší teplota (38,4 °C). Kabel bude samozřejmě při používání rozvinut, ale při měření oteplení jsem chtěl poukázat na to, že není dobré provozovat silové kabely smotané, protože se špatně chladí.

Kabelem protékal proud o velikosti 2,7 A do každé fáze krokového motoru a kdyby byl kabel rozvinut, tak by teplota kabelu byla nejspíše 30,2 °C dle obrázku č. 58.

Na obrázku č. 59 je vidět IR snímek krokového motoru při pracovním cyklu 50 %. Rozložení teploty při pracovním cyklu 100 % je totožné jako při pracovním cyklu 50 %, takže IR snímek krokového motoru při pracovním cyklu 100 % není uveden.

Naměřená maximální teplota na krokovém motoru při pracovním cyklu 100 % byla 88 °C, což je přibližně o 20 °C více než při pracovním cyklu 50 %.

Pro snížení teploty by se mohl zlepšit odvod tepla z krokového motoru na šasi (momentálně je odvod tepla veden podložkami, přes které je krokový motor připevněn k šasi). Pro zlepšení odvodu tepla by se mohli použít podložky s větší plochou ve tvaru půlměsíce. Tím by vznikl otvor pro hřídelku motoru a zároveň by se maximálně využila plocha pro odvod tepla z krokového motoru na šasi. Pro ještě lepší odvod by se mohla použít teplovodivá pasta, kterou by se podložky natřely.

7.7.2 Pracovní cyklus krokového motoru 50 %

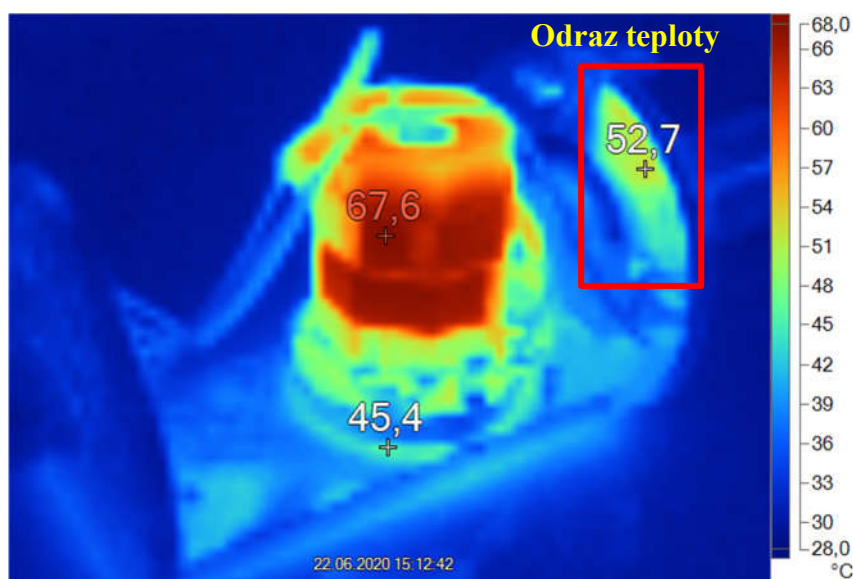
Čas, za který krokový motor odkrokuje od dorazu k dorazu a zpět je přibližně 16 s. Tento pracovní cyklus probíhal tak, že krokový motor odkrokoval od dorazu k dorazu a zpět a poté čekal 16 s a poté to samé znova. Tento pracovní cyklus lépe reprezentuje skutečný provoz elektronického plynu v praxi.

Měření proběhlo po měření pracovního cyklu 100 % a hodnoty teploty byly odečteny po čtyřech hodinách chodu krokového motoru v pracovním cyklu 50 %, aby se teploty stihly ustálit.

Rozložení teploty na stěnách základové stanice, uvnitř základové stanice a na kabelu vedoucí ke krokovému motoru jsou stejné, ale s jinými hodnotami teploty. Rozdíly teplot při pracovním cyklu 50 % oproti pracovnímu cyklu 100 % jsou uvedeny v tabulce č. 24 na následující straně.

Rozložení teploty krokového motoru je znázorněno na obrázku č. 59. Po čtyřech hodinách chodu krokového motoru v pracovním cyklu 50 % byla maximální teplota rovných 68 °C.

Při měření termokamerou může dojít k chybě měření v podobě odražené teploty od lesklého povrchu měřeného objektu na detektor termokamery. Ten potom není schopen rozlišit, zda se jedná o vlastní tepelné záření nebo o odraz teploty. Tento jev je zachycen na obrázku č. 59 v červené ohraničené oblasti, kde kamera zachytila teploty na šasi krokového motoru téměř 53 °C. Při přiložení ruky na toto místo byla pocitová teplota kolem 35 °C.



Obrázek 59 Snímek krokového motoru (pracovní cyklus 50 %)

Tabulka 24 Porovnání oteplení v různých pracovních cyklech

Místo měření teploty	Změřená maximální teplota [°C]	
	<i>Pracovní cyklus 50 %</i>	<i>Pracovní cyklus 100 %</i>
Krokový motor	68	88
Kabel LiYCY 8 x 0,34 vedoucí ke krokovému motoru	36,2	38,4
Na stěně základové stanice	36,6	39,2
Driver krokového motoru	67,3	81
Chladič driveru	38,7	43
Zdroj 230 V AC / 24 V DC	46,8	60
Snižující měnič (LM2596)	36	42
Arduino deska	40	44

Jak již bylo řečeno měření probíhalo s nastavením na driveru (fázový proud: 1,8 A, velikost kroku: 1). Reálně krokovým motorem tekla špičkový proud o velikosti 2,7 A. Měření probíhalo bez krytu na šasi krokového motoru, takže hodnoty teplot krokového motoru jsou nižší, než kdyby byl kryt nasazen. Výrobce udává maximální teplotu 130 °C, což ve všech pracovních cyklech bylo dodrženo s velkou rezervou.

Nejnižší teploty byly naměřeny vždy pod základovou deskou na montážní desce, protože deska je kovová a je nejvzdálenější od ohniska s nejvyšší teplotou.

7.8 Příkon celého zařízení

Při měření příkonu celého zařízení byl použit běžně dostupný digitální měřič spotřeby energie do zásuvky 230 V AC (typ BAT Art.-Nr. 40811) s přesností měření výkonu $\pm 3 \% / \pm 2 \text{ W}$ (obrázek č. 60). Měřič dokáže změřit síťové napětí, proud, odebíraný výkon a účinník. Správnost údajů, které měřič poskytuje, byla již dříve ověřena na síťovém analyzátoru Norma od firmy Fluke. Hodnoty s ním změřené jsou ukázány v tabulce č. 25.



Obrázek 60 Měřič příkonu

Tabulka 25 Změřený příkon celého zařízení

Měřená veličina	Při krokování	V klidovém stavu
Proud	0,4 A na 230 V AC	0,08 A na 227 V AC
Činný příkon	59 W na 230 V AC	9 W na 227 V AC
Účinník	0,65	1

Teoretický výpočet příkonu celého zařízení při krokování byl 69,48 W a v klidovém stavu vyšla teoretická spotřeba na 37,48 W viz 3.7 *Teoretický příkon celého zařízení*.

Proud do driveru, když se nekrokuje má hodnotu 0,26 A, při krokování stoupne proud na hodnotu 2,2 A. Toto platí při nastavení driveru OFF, OFF, ON, OFF, ON, ON čili fázový proud je nastaven na 1,8 A a řízení s celým krokem. Při provedení výpočtu příkonu driveru zjistíme, že příkon driveru při krokování je 52,8 W a když se nekrokuje je odebíraný příkon driveru 6,24 W.

Tabulka 26 Porovnání vypočtených a změřených hodnot příkonu

	Vypočtená hodnota [W]	Změřená hodnota [W]
Driver (když se krokuje)	60	52,8
Driver (když se nekrokuje)	31,2	6,24
Celkový příkon (když se krokuje)	62,536	59
Celkový příkon (když se nekrokuje)	33,736	9

Výše v tabulce č. 26 lze vidět velký rozdíl mezi vypočtenými a změřenými hodnotami, když se nekrokuje.

Důvod je takový, že před výběrem spínaného zdroje Meanwell jsem prováděl měření na driveru stejného typu, ale s jinou logikou řízení fázového proudu do krokového motoru.

Na driveru, na kterém jsem měřil před výběrem zdroje, neklesal jeho fázový proud na 30 %, ale po celou dobu kroku držel fázový proud na úrovni 100 %. Perioda krokování byla nastaven na 250 ms. V tomto projektu klesá proud driveru na 30 % po 100 ms od povelu „udělej krok“ (viz obrázek č. 49), když je nastavena perioda krokování větší než 100 ms.

Dalším důvodem je jiné nastavení driveru krokového motoru. Při měření před koupí spínaného zdroje byl driver krokového motoru nastaven na fázový proud 1,2 A a řízením s celým krokem. Reálně fázový proud do krokového motoru měl hodnotu 2,3 A (jmenovitá hodnota proudu krokového motoru je 2,3 A). V době měření příkonu celého zařízení byl driver krokového motoru nastaven na výstupní fázový proud 1,8 A a řízení s celým krokem. Reálně fázový proud do krokového motoru měl hodnotu 2,7 A.

Další důvod odchylky je ten, že ve chvíli měření příkonu celého zařízení nebyly napájeny všechny LED diody, nebyly sepnuty k zemi všechna tlačítka, všechny přepínače a také obě stopy na enkodérech. Toto všechno bylo při výpočtu zahrnuto, byť takového stavu nelze dosáhnout. Samozřejmě tato odchylka je vůči spotřebě driveru krokového motoru zanedbatelná.

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce jsem vytvořil funkční návrh systému elektronického plynu s použitím existujících komponent a splněním všech požadavků na zařízení. Práce se skládala z návrhu logického propojení všech komponent a externích modulů k Arduino desce. Byl vytvořen funkční kód pro Arduino tak, aby celý systém elektronického plynu logicky a bez chyb fungoval. Dále bylo nutné vyvrtat otvory do elektroinstalačních krabic pro připevnění indikačních a ovládacích prvků, konektorů a průchodek. V případě základové stanice bylo nutné všechny komponenty připevnit na montážní desku. Nakonec v rámci práce byla otestována funkčnost celého zařízení a změřeny oteplení jednotlivých komponentů při různých pracovních cyklech chodu krokového motoru.

Po návrhu a osazení všech součástek na základovou desku jsem při kontrole narazil na jeden problém. Při návrhu jsem zapomněl propojit pin GND na pinové liště JP6 (slouží pro připojení bluetooth modulu) se zemním polygonem celé základové desky. Pomocí drátku jsem tuto chybu naštěstí opravil, takže nebylo nutné kvůli tomu znova vyrábět DPS.

Při vytvoření kódu pro krokování motoru na základě impulsů z mechanických rotačních enkodérů jsem zjistil, že logické úrovně mikrospínačů reprezentující dorazy krokového motoru jsou závislé na směru otáčení. Toto mi opravdu nedávalo smysl, tak jsem připojil signál od mikrospínačů na osciloskop a zjistil jsem, že je tam velké rušení. Bylo to způsobené tím, že v jednom kabelu je veden signál jak pro mikrospínače, tak fázový proud pro krokový motor řízený pomocí PWM. Nelogické chování stavů mikrospínačů jsem opravil tím, že jsem co nejbližší ke svorkovnici DRIVER na pinech pro připojení mikrospínačů (MiS1 a MiS2) na základové desce zaletoval kondenzátory o velikosti 100 nF a změnil pull-up rezistory na těchto vstupech z 10 k Ω na 1 k Ω .

Další zvláštností bylo, že při připojení Arduina k PC přes USB se mi napětí dostávalo na 24 V DC vstup snižujícího DC-DC měniče při zařízení odpojeném od sítě 230 V AC. Je to z důvodu, že v tomto projektu napájím Arduino desku přes pin 5 V, abych se vyhnul velké výkonové ztrátě na Arduino stabilizátoru. Tento případ byl opraven odpájením MOSFET tranzistoru (FDN340P) na Arduino desce umístěným nalevo od krystalu 16 MHz a tím jsem přerušil napájení Arduina z USB. Takže při programování Arduino desky musí být celé zařízení připojené k síti 230 V AC, aby došlo k nahrání kódu do Arduino desky.

Všechna schémata a návrhy desek prezentována v této bakalářské práci jsou po opravě vyjmenovaných chyb.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MPS. *MPS* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15].
Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>
- [2] How to mechatronics. *How to mechatronics* [online]. 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>
- [3] ELUC. *ELUC* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/806>
- [4] HRABAVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001, 265 s. ISBN 80-7100-809-5.
- [5] ANUSHA. Stepper Motor Control Using Arduino. *ELECTRONICS HUB* [online]. 2020 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/stepper-motor-control-using-arduino/>
- [6] KOHOUTEK, Ondřej. *Ročníkový projekt I*. Univerzita Pardubice, 2019.
- [7] Krokové motory. *Profirobot* [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <http://profirobot.cz/krokove-motory/>
- [8] *POWERMAX II* [online katalogový list]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <http://www.portalnaukowy.edu.pl/allegro/powermax22.pdf>
- [9] *HY-DIV268N-5A* [online katalogový list]. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1296052/ETC/HY-DIV268N-5A/1>
- [10] MAŠEK, Zdeněk. *Driver pro krokový motor HY DIV268N-5A*. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera, 2020.
- [11] *Arduino Mega 2560 Datasheet* [online katalogový list]. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/arduinomega2560datasheet.pdf>
- [12] GM Electronic. *Gme.cz* [online]. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/napajeci-modul-3-40v-3a-step-down#product-detail>
- [13] MAŠEK, Zdeněk. *Účinnost DC-DC měniče LM2596 (pro Arduino)*. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera, 2019.
- [14] *LRS-100-SPEC* [online katalogový list]. 2017 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.332-985.1.pdf>

- [15] *Adafruit RFM69HCW and RFM9X LoRa Packet Radio Breakouts* [online]. 2016 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-rfm69hcw-and-rfm96-rfm95-rfm98-lora-packet-padio-breakouts/overview>
- [16] *GM Electronic: Bluetooth modul HC-05* [online]. [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/bluetooth-modul-hc-05>

SEZNAM ZKRATEK

Ω	Ohm (jednotka odporu)
A	Ampér (jednotka proudu)
AC	Alternating Current (střídavý proud)
CS	Chip Select
CTC	Clear Timer on Compare
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
DPS	Deska Plošných Spojů
ESD	ElectroStatic Discharge (elektrostatický výboj)
IR	Infrared Radiation (infračervené záření)
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
mc	mili kandela (jednotka svítivosti)
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PWM	Pulse-Width Modulation (pulzně-šířková modulace)
SCK	Serial peripheral interface Clock pin
SPI	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
V	Volt (jednotka napětí)
W	Watt (jednotka výkonu)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Princip krokového motoru [1].....	12
Obrázek 2	Rotor hybridního krokového motoru [2].....	13
Obrázek 3	Čelní pohled na hybridní krokový motor [2]	14
Obrázek 4	Lineární krokový motor [3].....	15
Obrázek 5	Principiální schéma unipolárního uspořádání vinutí.....	15
Obrázek 6	Principiální schéma bipolárního uspořádání vinutí.....	16
Obrázek 7	Jednofázové řízení [5].....	17
Obrázek 8	Dvoufázové řízení [5]	17
Obrázek 9	Průběhy proudu oběma fázemi motoru při řízení s celým krokem [6]	18
Obrázek 10	Oscilace rotoru při přechodu z jedné rovnovážné polohy do druhé při a) jednofázovém řízení a b) dvojfázovém řízení [4]	18
Obrázek 11	Řízení s polovičním krokem a tabulka spínacích kombinací [5]	19
Obrázek 12	Průběhy proudu oběma fázemi motoru při řízení s polovičním krokem [6].....	19
Obrázek 13	Průběhy proudu oběma fázemi motoru při mikrokrokování [6]	20
Obrázek 14	Mikrokrokování [1].....	20
Obrázek 15	Schéma omezení proudu předřadným rezistorem [7]	22
Obrázek 16	Dvouhadinové řízení proudu [7]	22
Obrázek 17	Pulsní řízení proudu [7].....	23
Obrázek 18	Arduino Mega 2560	25
Obrázek 19	Blokové schéma elektronického plynu	26
Obrázek 20	Základová stanice s otevřeným víkem	27
Obrázek 21	Mikrospínače umístěné na šasi krokového motoru.....	28
Obrázek 22	Fotografie ovladačů. Ovladače jsou identické.	28
Obrázek 23	Pohled na víko základové stanice	31
Obrázek 24	Čelní pohled na ovladač 2	31
Obrázek 25	Použitý krokový motor s mechanickým držákem.....	33
Obrázek 26	Schématické znázornění zapojení vývodů krokového motoru [8].....	34
Obrázek 27	Pohled na driver HY-DIV268-N-5A [9].....	35
Obrázek 28	Snižující DC-DC měnič 24 V DC / 5 V DC s LM2596 [12]	39
Obrázek 29	Graf závislosti účinnosti snižujícího měniče 24 V / 5 V na odebíraném proudu [13]	40

Obrázek 30 Spínaný zdroj MEAN WELL LRS-100-24 [14].....	42
Obrázek 31 Schématické znázornění konektoru d-sub 15 na šasi krokového motoru	45
Obrázek 32 Základová deska.....	47
Obrázek 33 Zpracováváný signál z jedné stopy enkodéru	49
Obrázek 34 Rádiový modul Adafruit RFM69HCW [15].....	51
Obrázek 35 Bluetooth modul HC-05 [16]	52
Obrázek 36 Vnitřní propojení ovladače.....	54
Obrázek 37 Vrchní pohled na DPS ovladače	58
Obrázek 38 Přední strana základové desky	58
Obrázek 39 Zadní strana oboustranné základové desky.....	59
Obrázek 40 Vybraná krabice pro základovou stanici	61
Obrázek 41 Ukázka vytvořeného projektu GCC C++ Arduino Project	63
Obrázek 42 Vývojový diagram rutiny přerušení	66
Obrázek 43 Vývojový diagram rutiny přerušení pro pevnou periodu krokování.....	68
Obrázek 44 Průběh zvlnění napětí, když se nekrokuje.....	72
Obrázek 45 Průběh zvlnění napětí při krokování	73
Obrázek 46 Průběh zvlnění napětí, když se nekrokuje.....	74
Obrázek 47 Funkce krokování při stisku tlačítka stop na jednom z ovladačů	75
Obrázek 48 Odběr ze spínaného zdroje při krokování	76
Obrázek 49 Funkce krokování při nastavení periody krokování větší než 100 ms	77
Obrázek 50 Detail fázových proudů na úrovni 100 %	78
Obrázek 51 Funkce krokování na základě průběhů stop enkodéru na ovladači 2.....	79
Obrázek 52 Ukázka udělání jednoho kroku na enkodéru.....	80
Obrázek 53 Detail průběhu zobrazeného na obrázku č. 52	81
Obrázek 54 Funkce tvarovače 74HC14.....	82
Obrázek 55 Zpracování signálu od enkodéru	83
Obrázek 56 IR snímek uzavřené základové stanice (z pohledu na výstupy).....	84
Obrázek 57 Teplota zaznamenána uvnitř základové stanice (pracovní cyklus 100 %)......	85
Obrázek 58 IR snímek kabelu LiYCY 8 x 0,34 vedoucí ke krokovému motoru	86
Obrázek 59 Snímek krokového motoru (pracovní cyklus 50 %)	87
Obrázek 60 Měřič příkonu.....	89

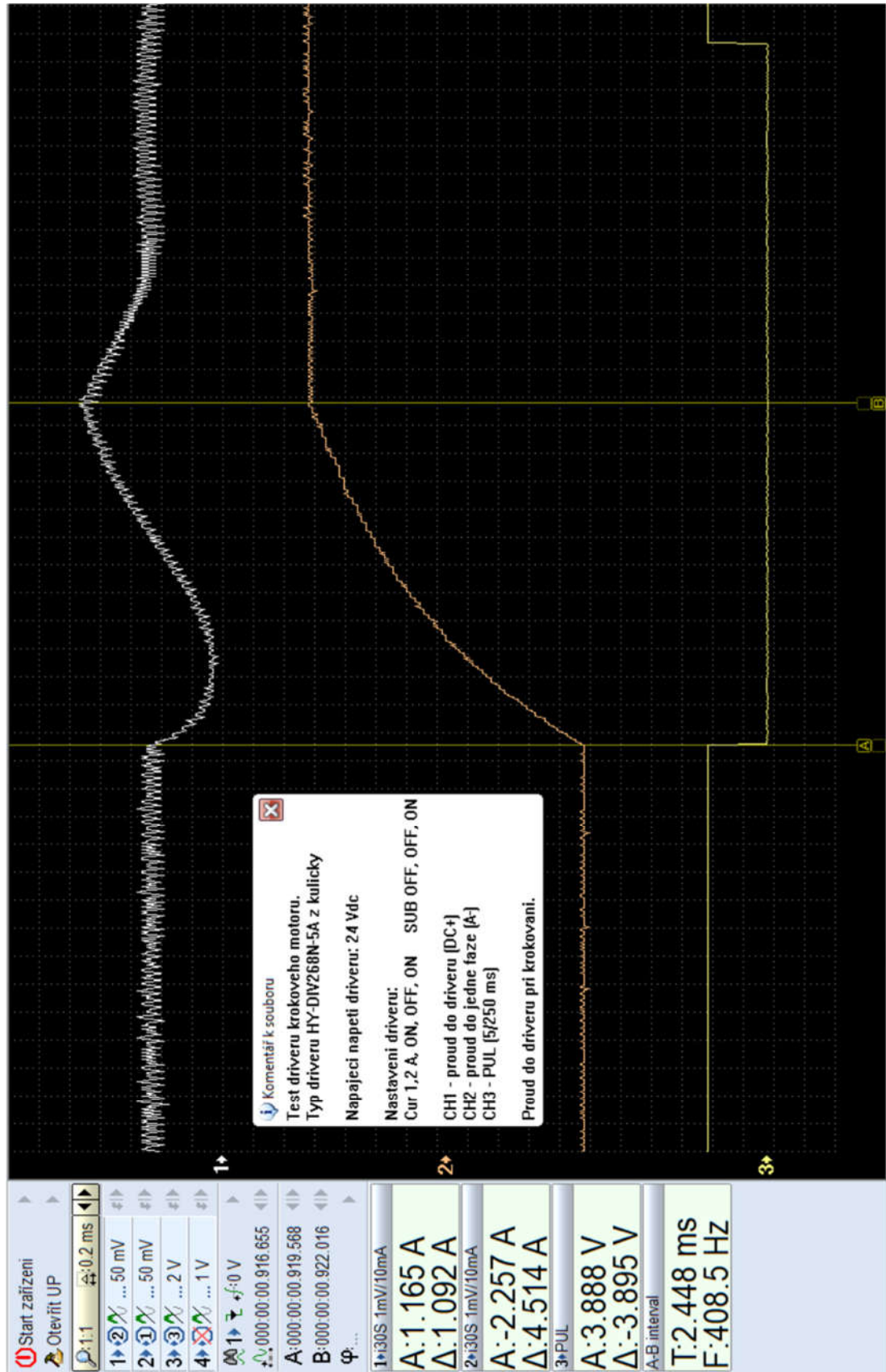
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Srovnání Arduino Uno a Arduino Mega 2560.....	25
Tabulka 2	Význam LED diod v systému elektronického plynu	30
Tabulka 3	Tabulka chyb.....	32
Tabulka 4	Popis vývodů krokového motoru	34
Tabulka 5	Parametry krokového motoru [8]	34
Tabulka 6	Nastavení přepínačů na DIP panelu	36
Tabulka 7	Naměřený proud fázemi krokového motoru [10]	36
Tabulka 8	Proudový odběr Arduina z napájecí větve 5 V	38
Tabulka 9	Určení maximální velikosti I_{OUT} na napájecí větvi 5 V	40
Tabulka 10	Parametry spínaného zdroje 230 V AC / 24 V DC	42
Tabulka 11	Tabulka celkového příkonu na napěťové úrovni 24 V DC	43
Tabulka 12	Připojení krokového motoru ke driveru	46
Tabulka 13	Připojení mikrospínačů k základové desce do konektoru DRIVER	46
Tabulka 14	Připojení ovladačů k Arduino desce	49
Tabulka 15	Pinout 74HC14 pro tvarování signálů z enkodérů	49
Tabulka 16	Připojení driveru krokového motoru k Arduino Mega 2560	50
Tabulka 17	Připojení mikrospínačů k Arduino desce	51
Tabulka 18	Připojení rádiového modulu RFM69HCW k Arduino Mega 2560.....	52
Tabulka 19	Připojení bluetooth modulu HC-05 k Arduino Mega 2560	53
Tabulka 20	Připojení LED diod umístěných na víku základové stanice k mikrokontroléru ..	53
Tabulka 21	Tabulka uvádějící význam čísel v obrázcích č. 38 a č. 39	59
Tabulka 22	Seznam použitých měřicích přístrojů.....	71
Tabulka 23	Hodnoty změřené pomocí multimetru	71
Tabulka 24	Porovnání oteplení v různých pracovních cyklech	88
Tabulka 25	Změřený příkon celého zařízení.....	89
Tabulka 26	Porovnání vypočtených a změřených hodnot příkonu	90

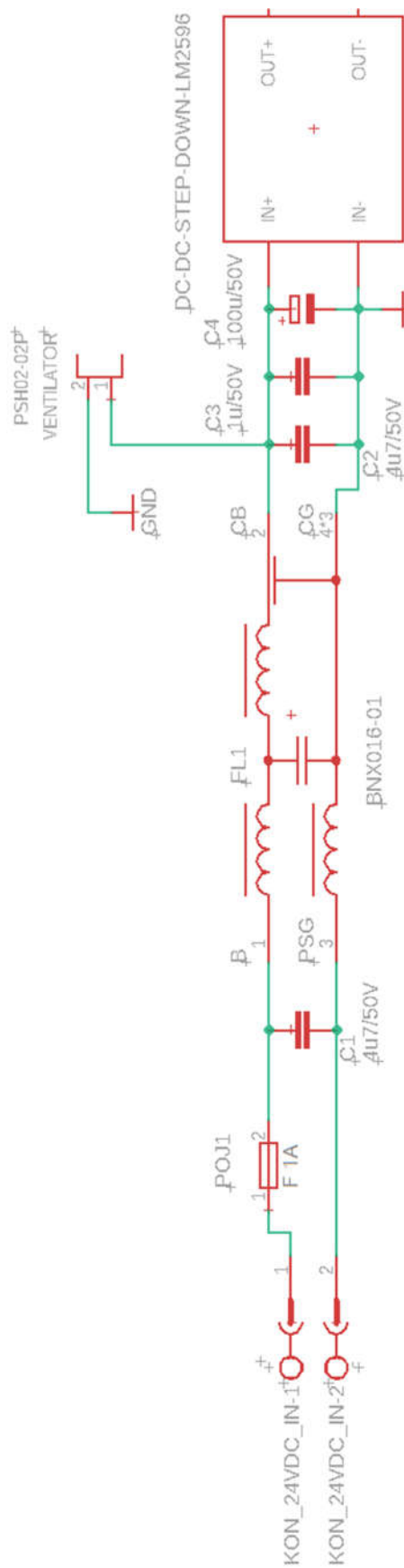
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Měření proudu driverem krokového motoru před koupí spínaného zdroje.....	99
Příloha B - Vstupní napájení základové desky 24 V DC.....	100
Příloha C – Výstup snižovacího měniče	101
Příloha D – Připojení ovladačů k Arduino.....	102
Příloha E – Zapojení driveru krokového motoru a mikrospínačů do Arduino Mega 2560	103
Příloha F – Schéma zapojení rádiového modulu Adafruit RFM69HCW k Arduino Mega 2560	104
Příloha G – Schéma zapojení Bluetooth modulu HC-05 k Arduino Mega 2560	105
Příloha H - Pohled z vnější strany na ovladače	106
Příloha CH – Schéma zapojení ovladačů.....	107
Příloha I – Návrh desky ovladače	108
Příloha J – Náčrt víka krabičky ovladače	109
Příloha K - Náčrt uložené DPS v krabičce ovladače.....	110
Příloha L Náčrt boční stěny krabičky ovladače pro vyvrtání otvoru pro d-sub 8 konektor .	111
Příloha M – Návrh základové desky (vrstva bottom)	112
Příloha N – Návrh základové desky (vrstva top)	113
Příloha O – Náčrt víka základové stanice	114
Příloha P – Náčrt boční stěny základové stanice.....	115
Příloha Q – Rozmístění komponent v základové stanici	116
Příloha R – Zakreslení a umístění komponentů na montážní desku do základové stanice	117
Příloha S – Fotografie hotové základové stanice.....	119
Příloha T – Funkční schéma systému elektronického plynu	121

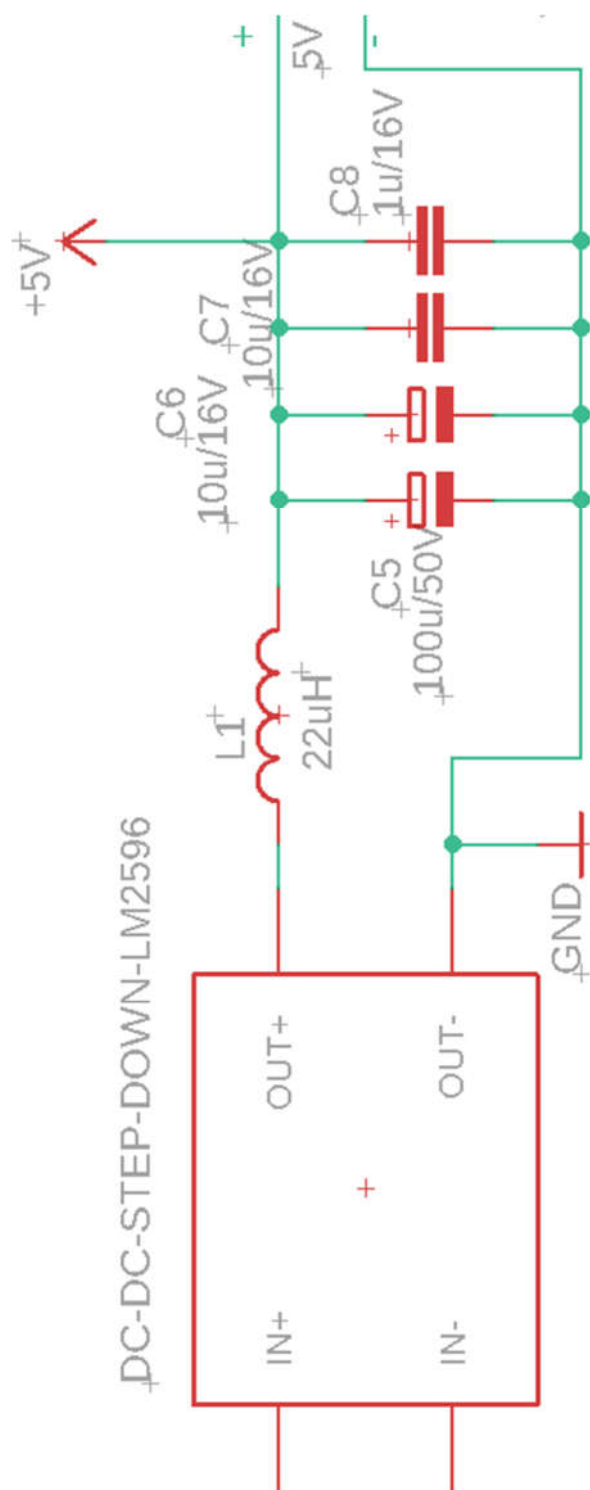
PŘÍLOHA A – MĚŘENÍ PROUDU DRIVEREM KROKOVÉHO MOTORU PŘED KOUPI SPÍNANÉHO ZDROJE



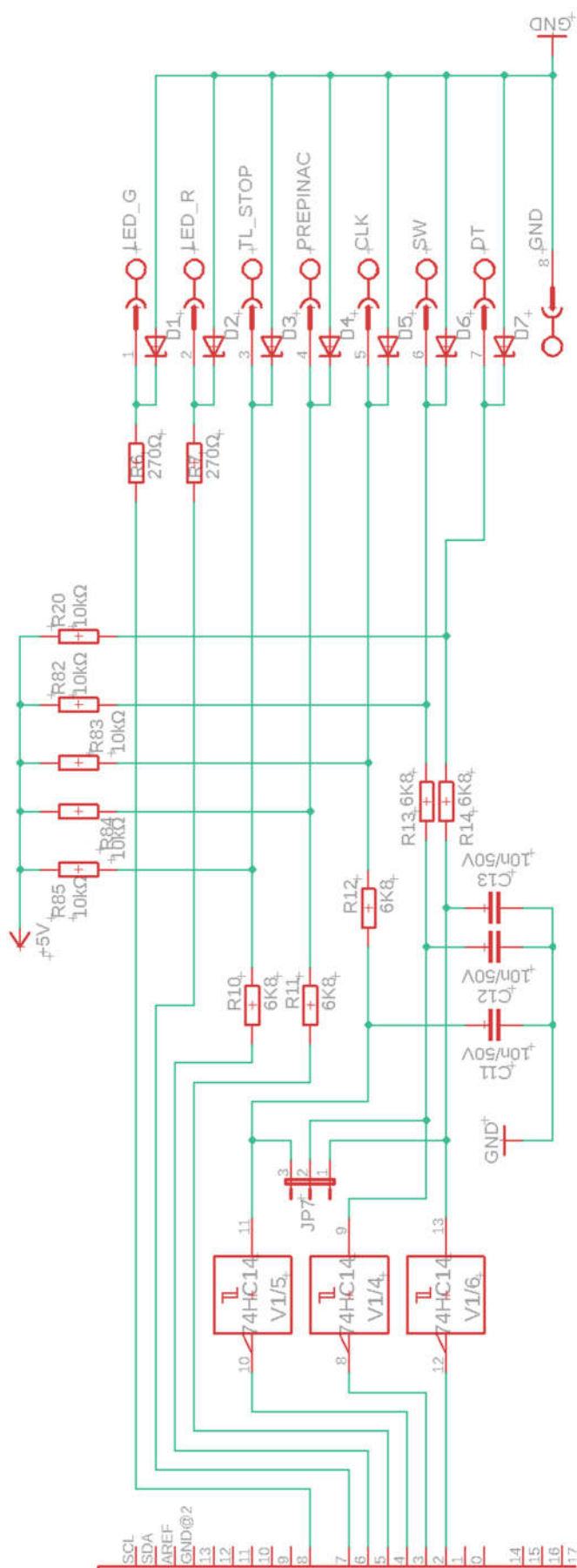
PŘÍLOHA B - VSTUPNÍ NAPÁJENÍ ZÁKLADOVÉ DESKY 24 V DC



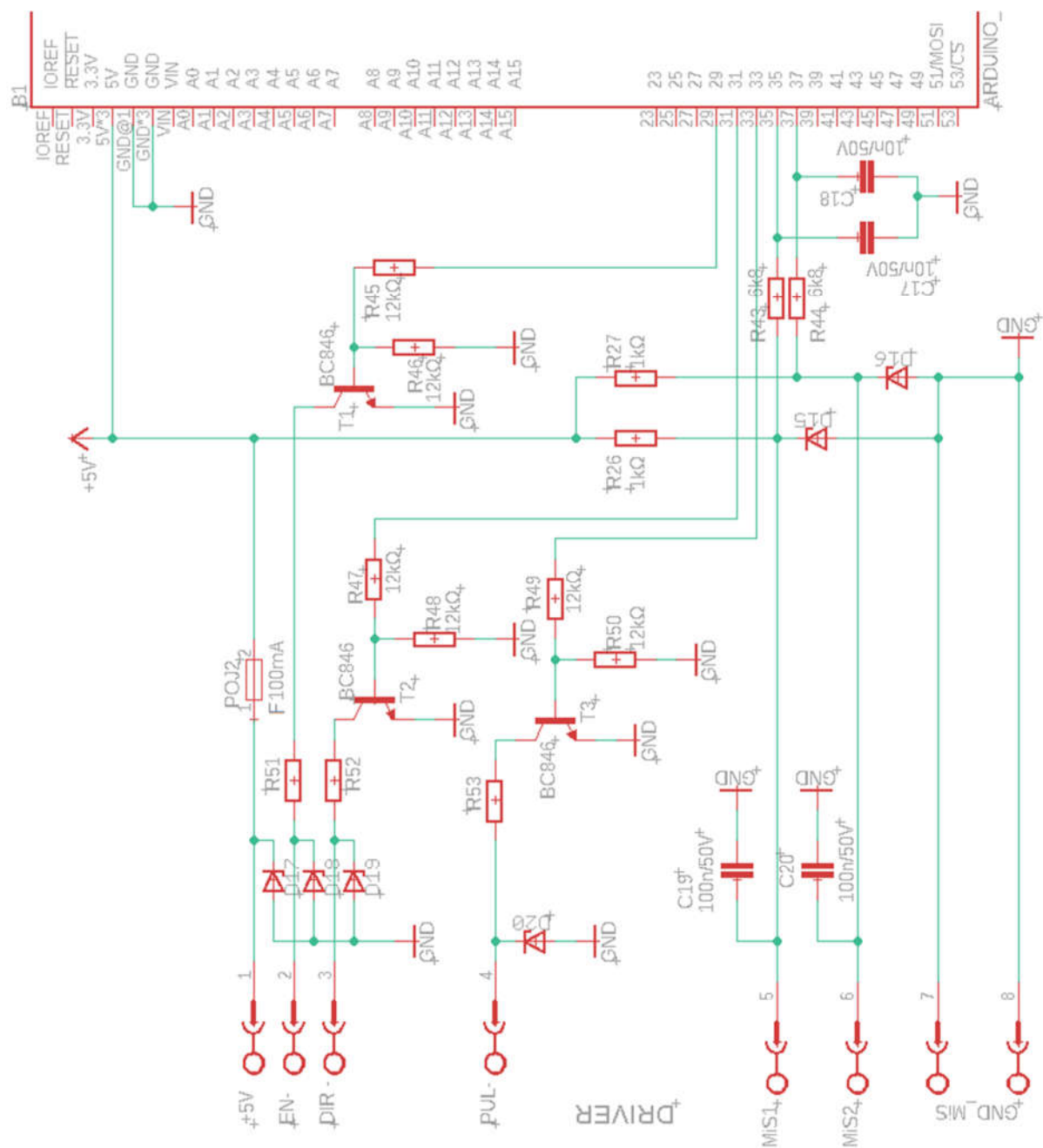
PŘÍLOHA C – VÝSTUP SNIŽOVACÍHO MĚNIČE



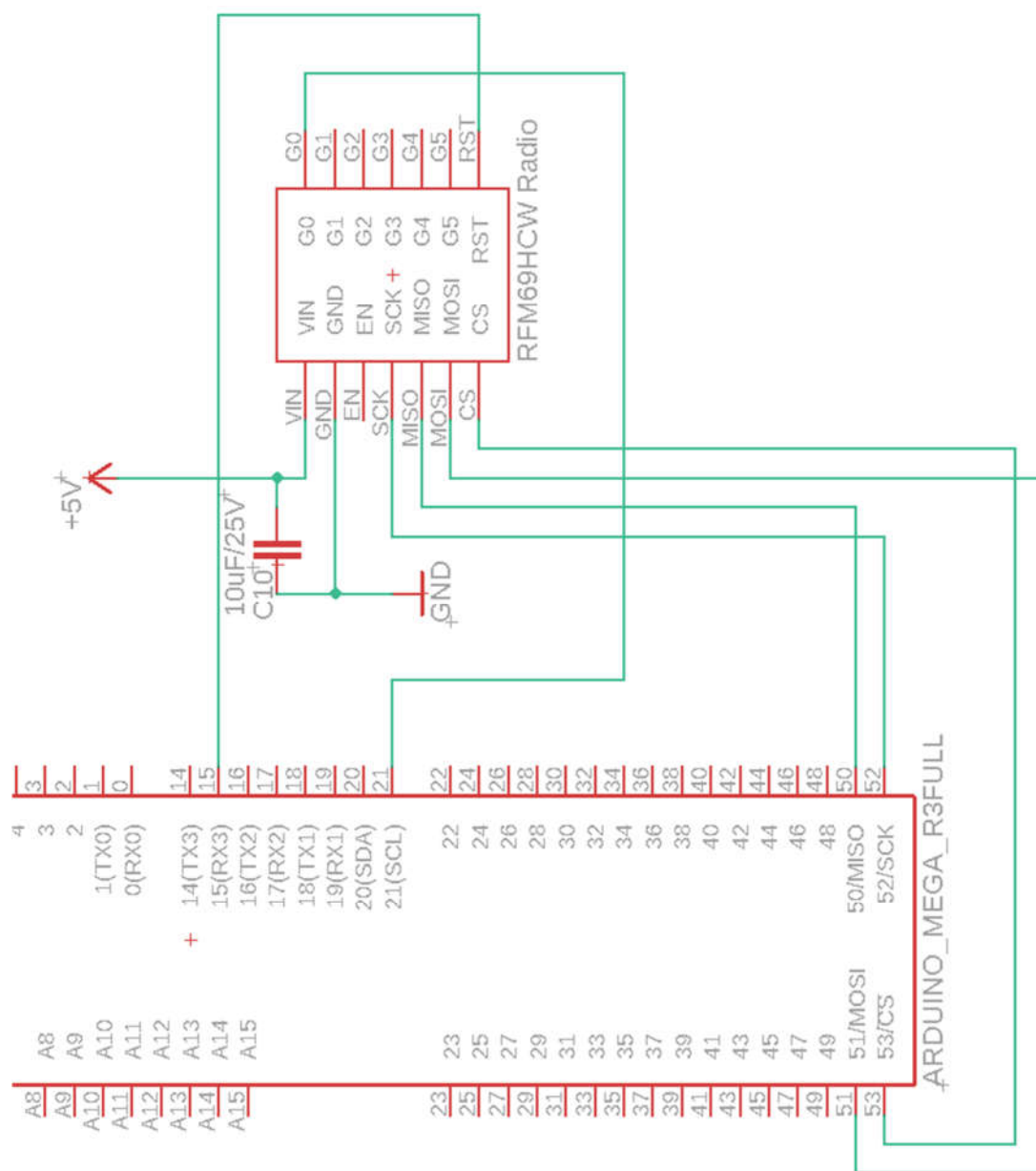
PŘÍLOHA D – PŘIPOJENÍ OVLADAČŮ K ARDUINU



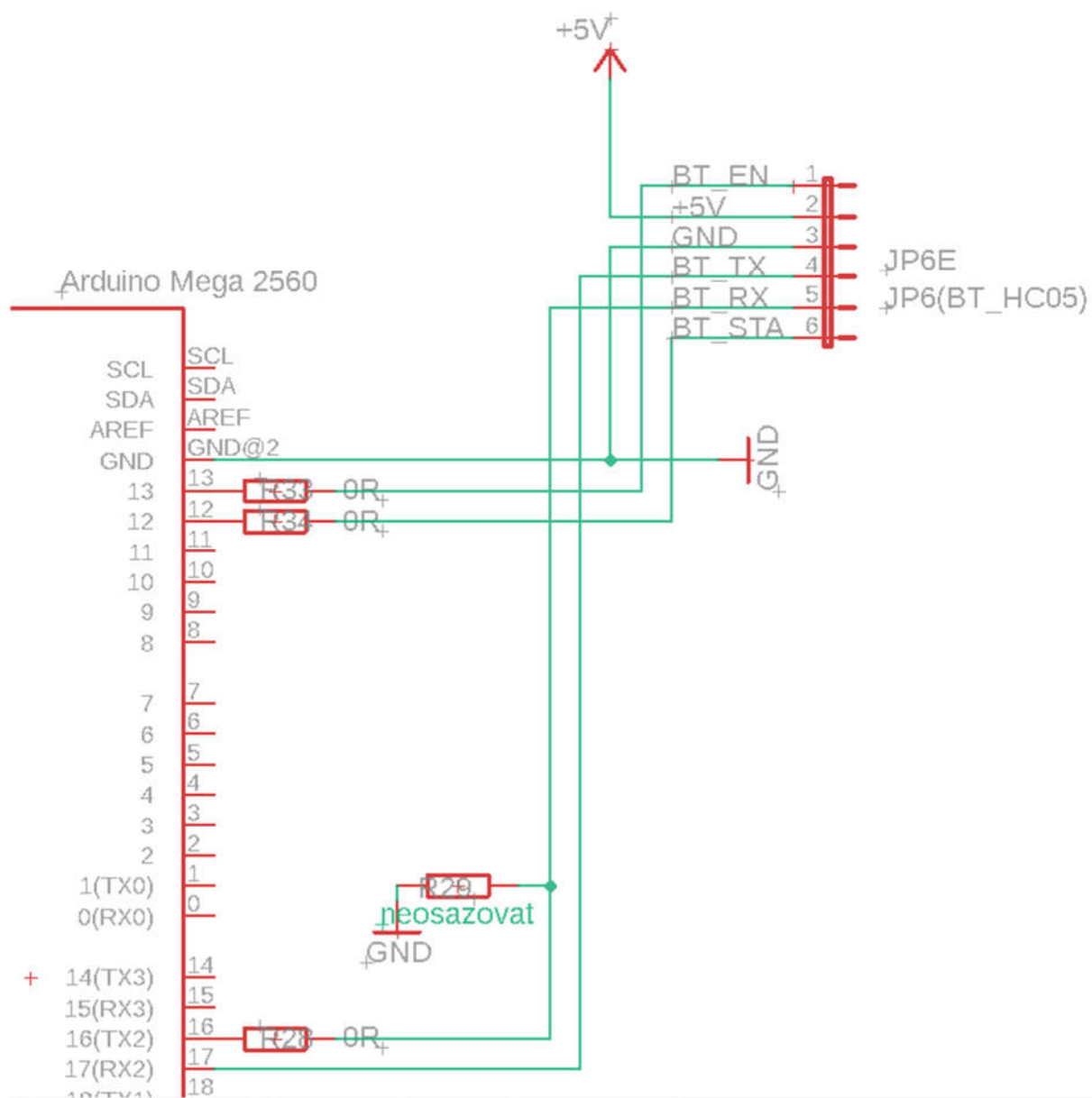
PŘÍLOHA E – ZAPOJENÍ DRIVERU KROKOVÉHO MOTORU A MIKROSPÍNAČŮ DO ARDUINO MEGA 2560



PŘÍLOHA F – SCHÉMA ZAPOJENÍ RÁDIOVÉHO MODULU ADAFRUIT RFM69HCW K ARDUINO MEGA 2560



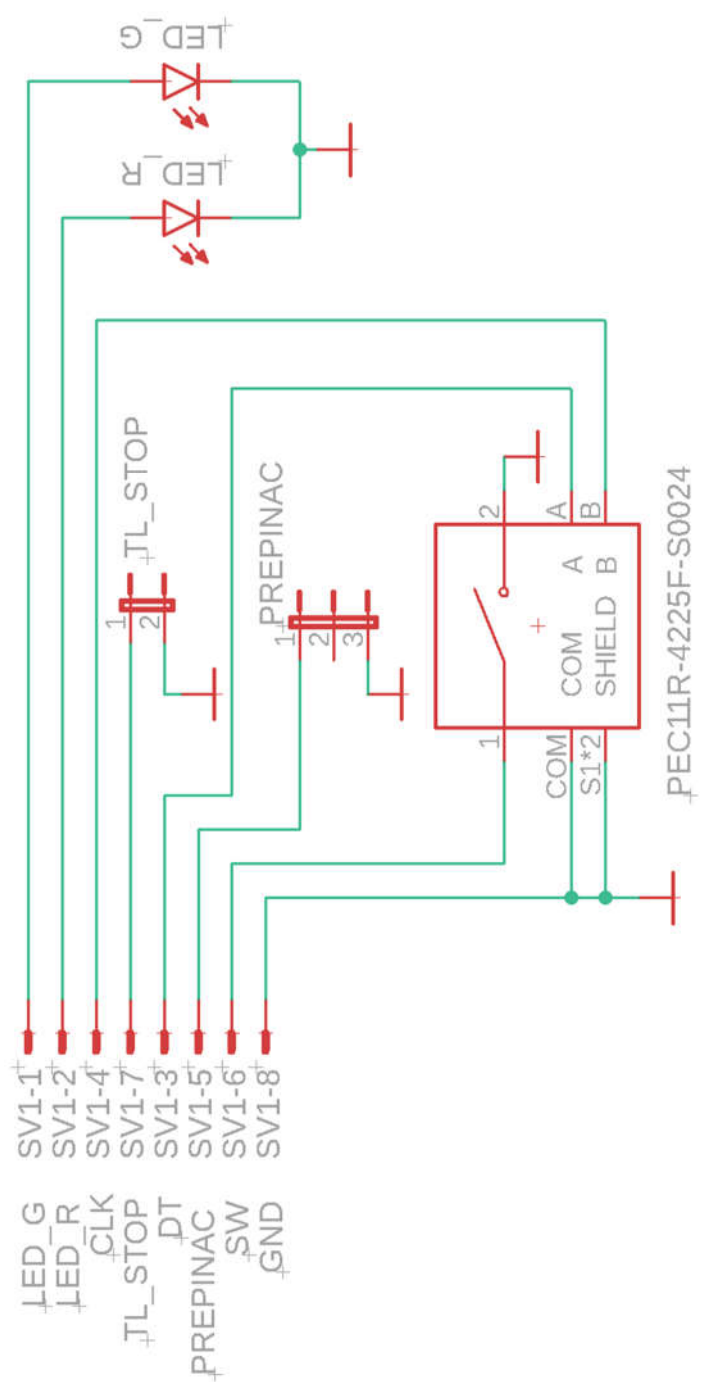
PŘÍLOHA G – SCHÉMA ZAPOJENÍ BLUETOOTH MODULU HC-05 K ARDUINU MEGA 2560



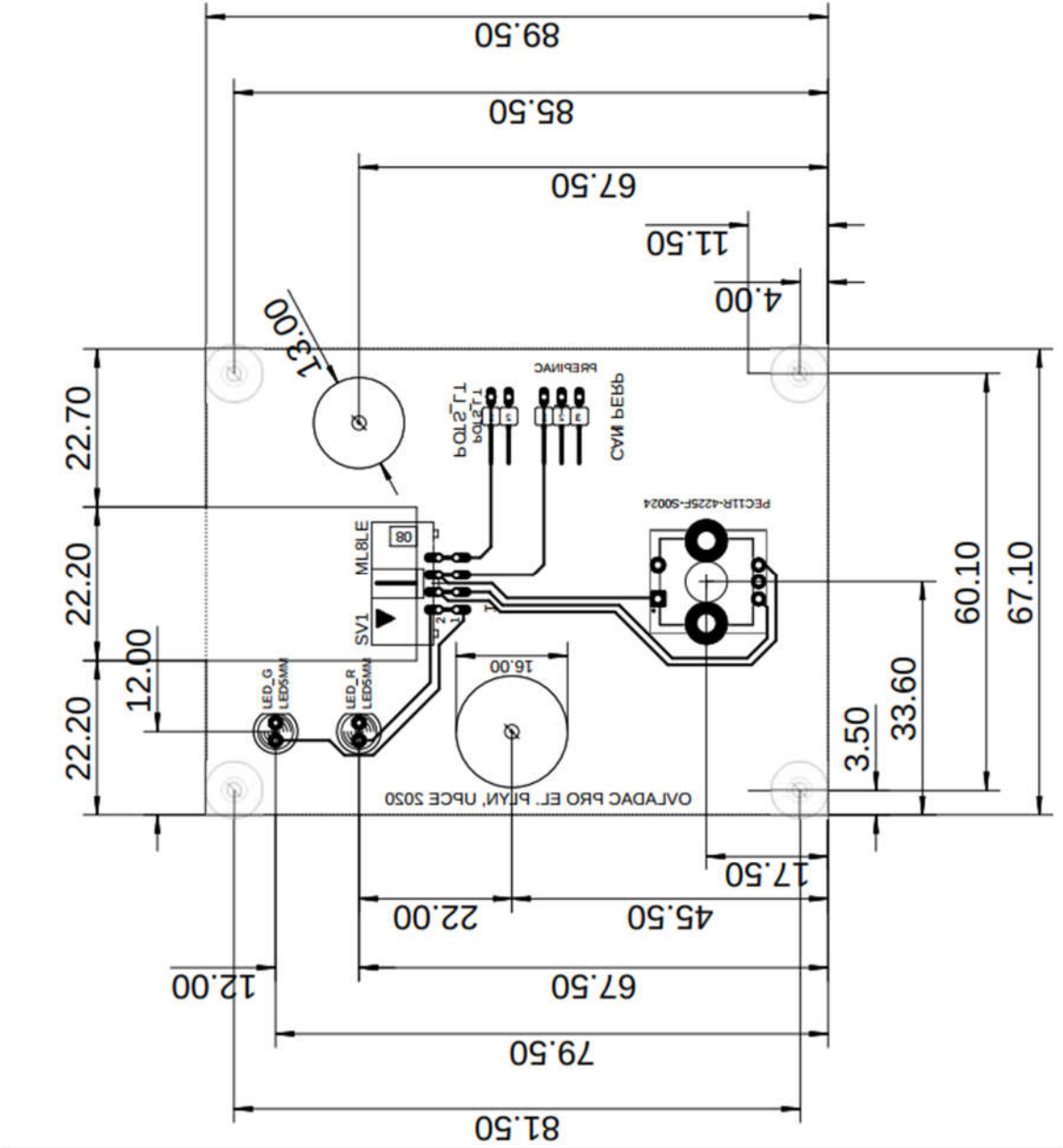
PŘÍLOHA H - POHLED Z VNĚJŠÍ STRANY NA OVLADAČE



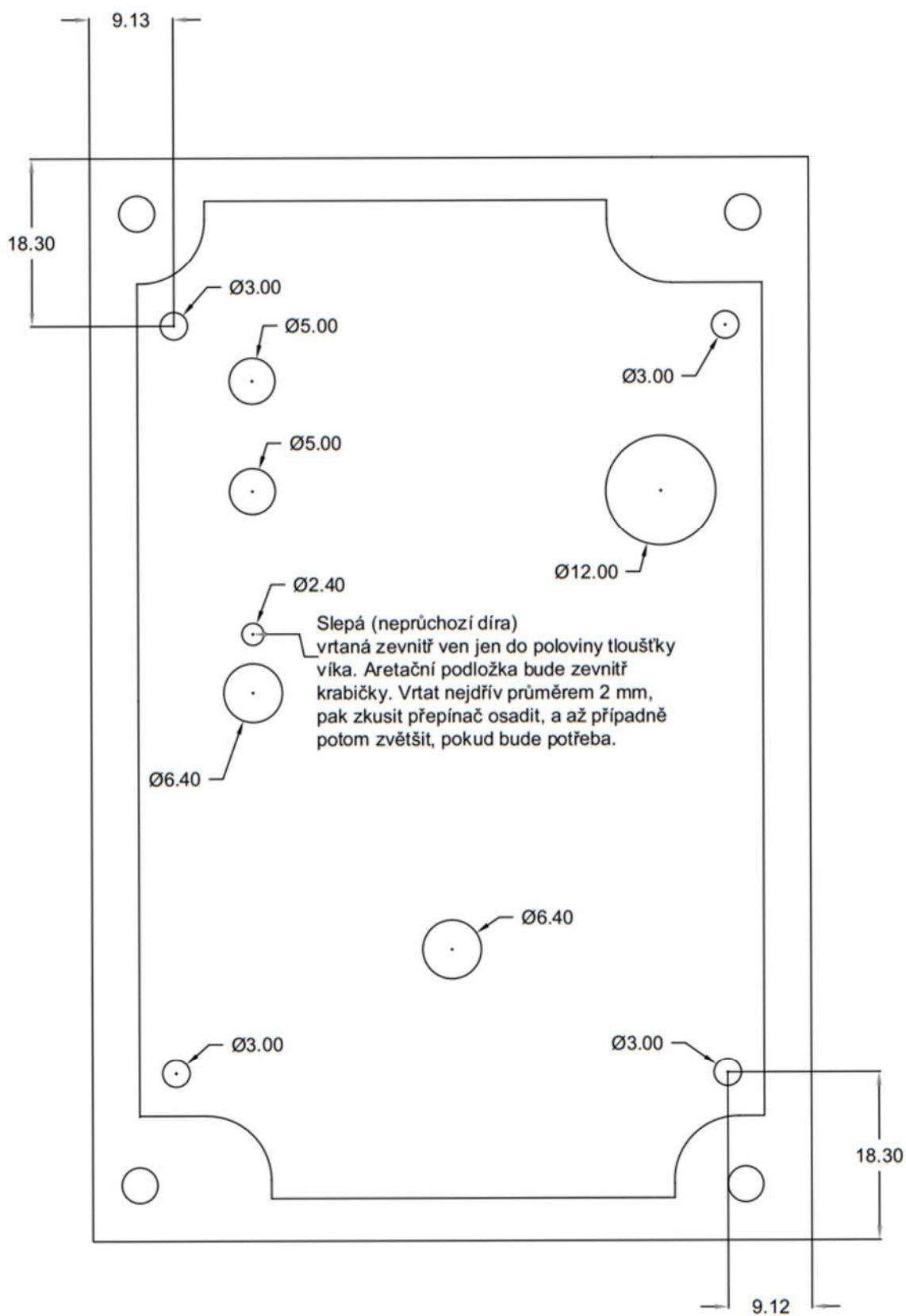
PŘÍLOHA CH – SCHÉMA ZAPOJENÍ OVLADAČŮ



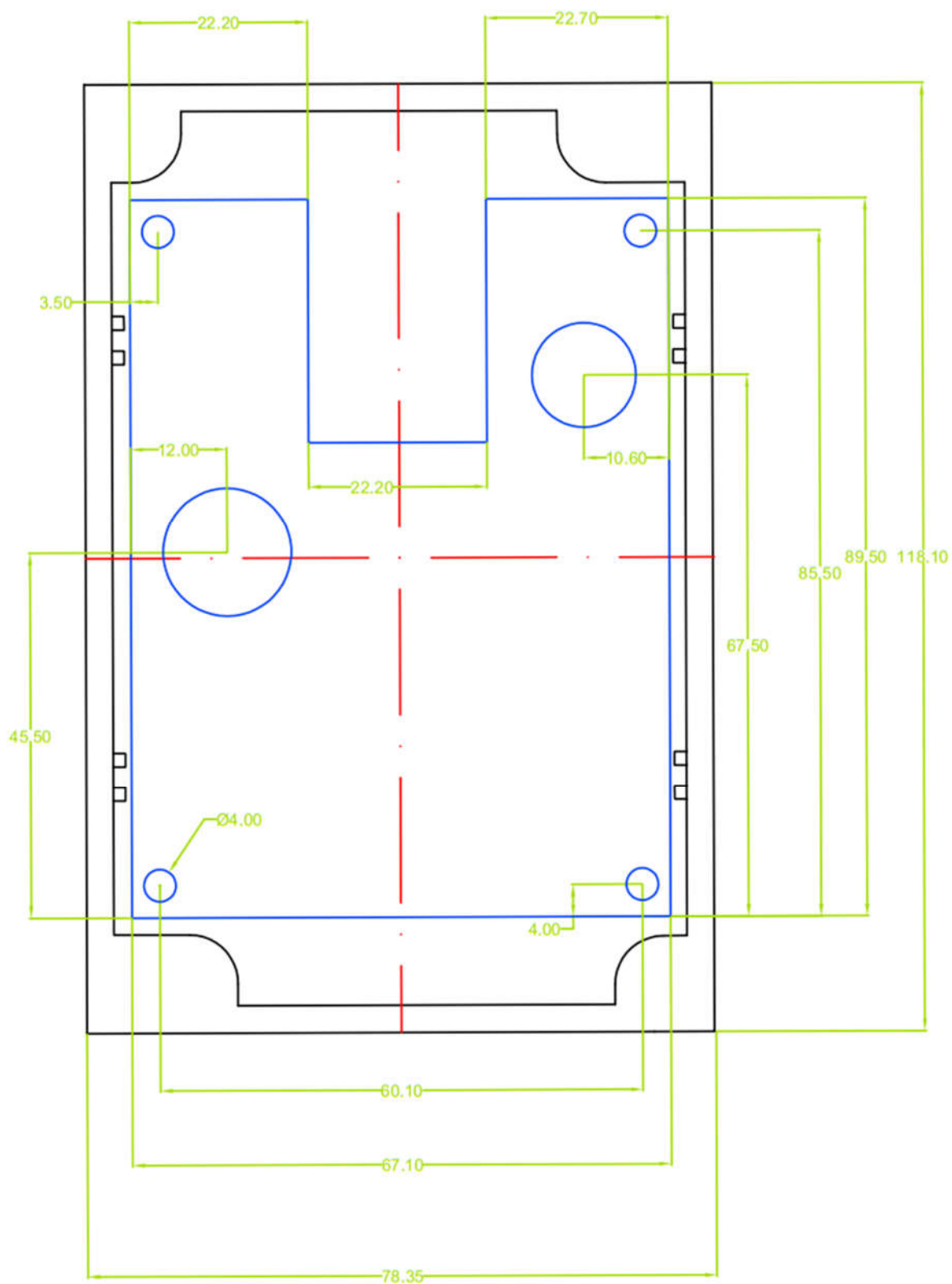
PŘÍLOHA I – NÁVRH DESKY OVLADAČE



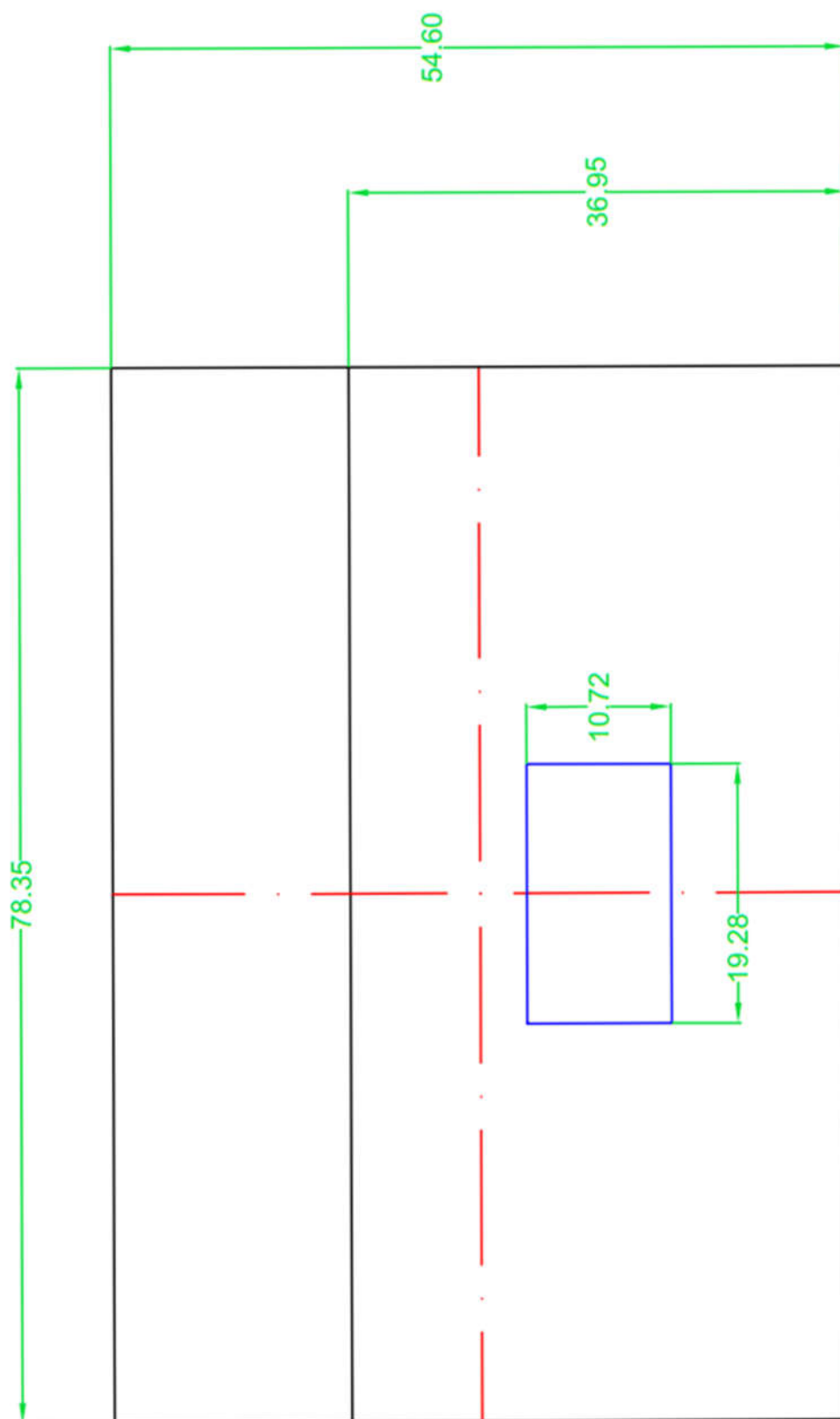
PŘÍLOHA J – NÁKRES VÍKA KRABÍČKY OVLADAČE



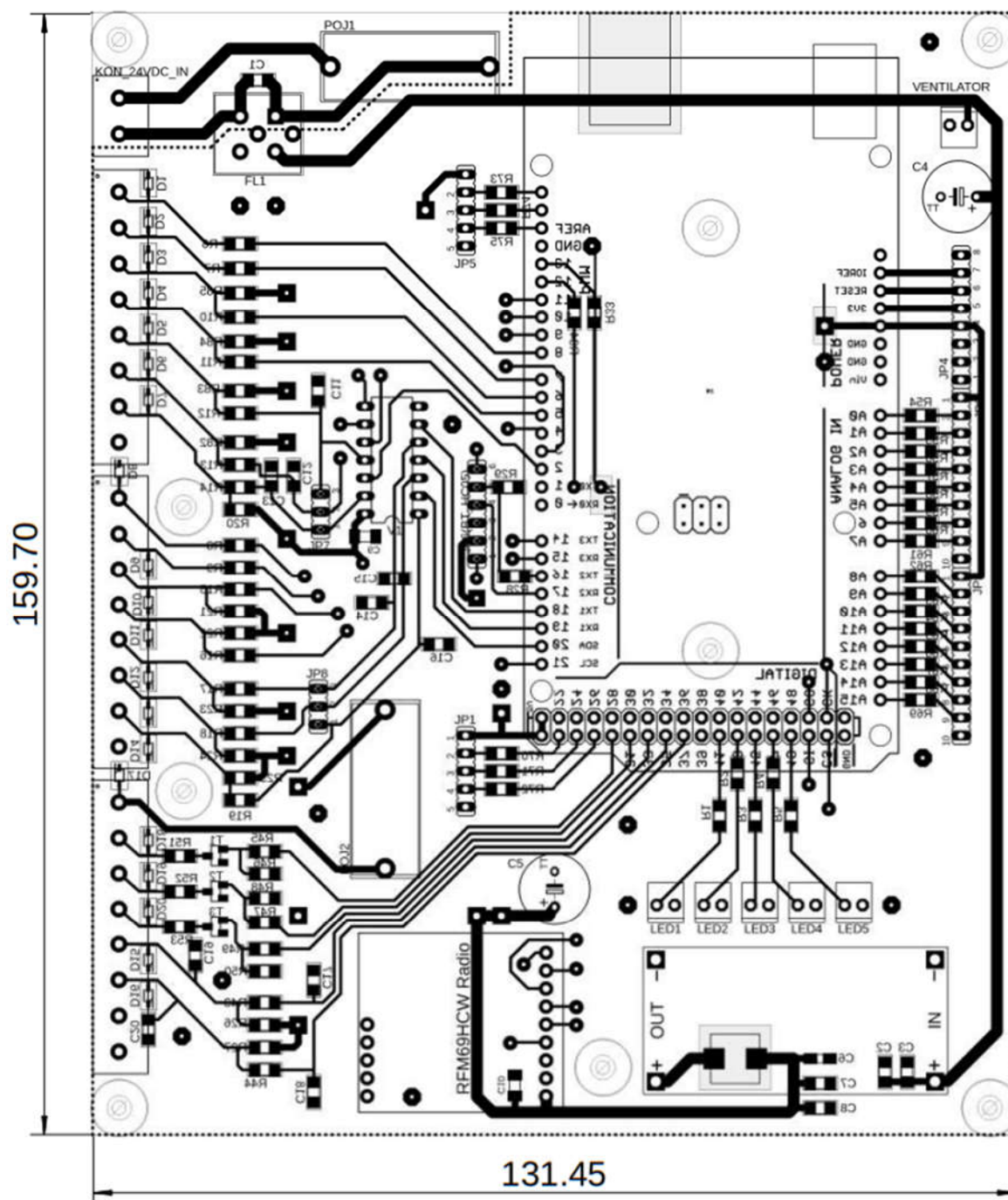
PŘÍLOHA K - NÁKRES ULOŽENÉ DPS V KRABIČCE OVLADAČE



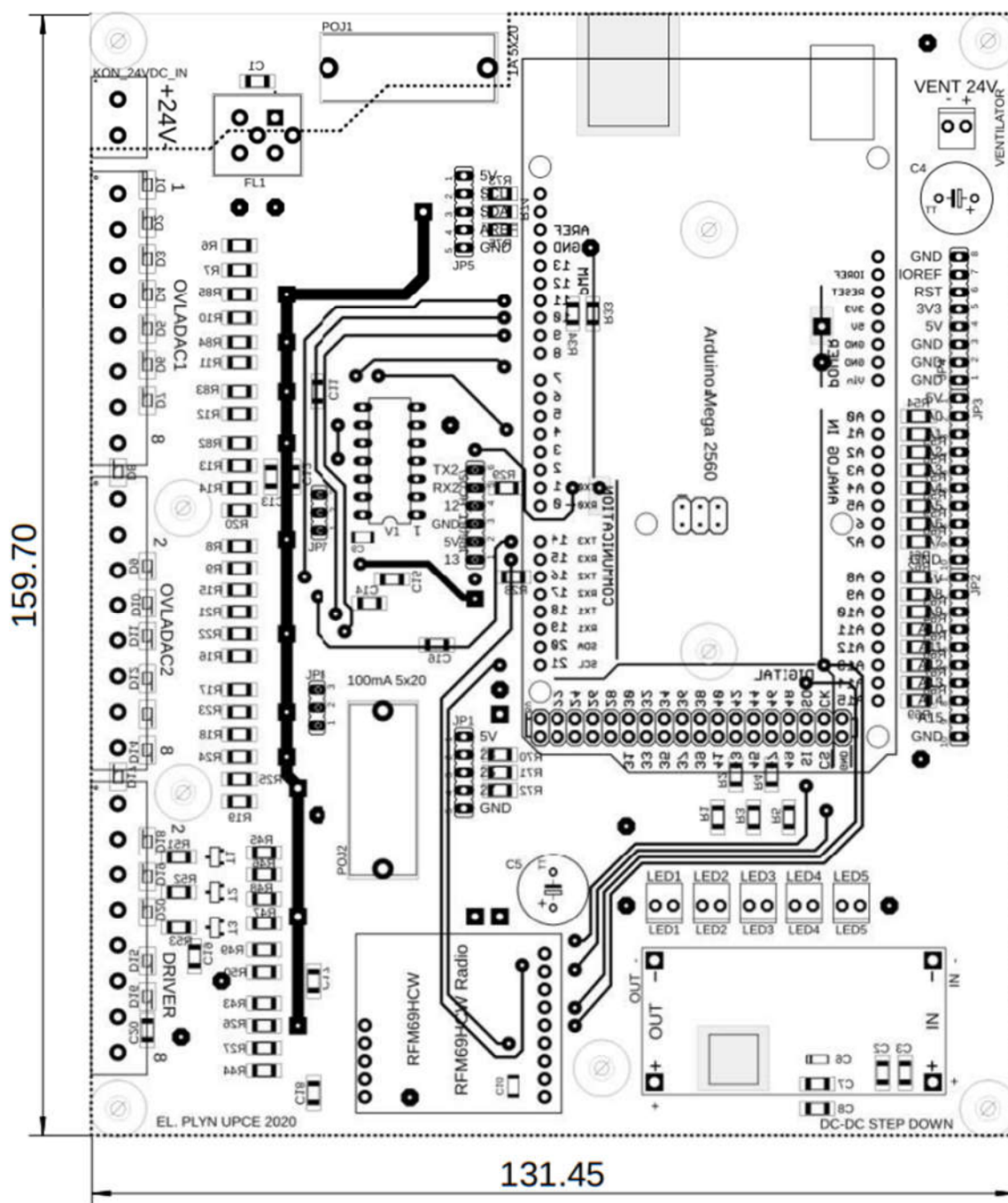
**PŘÍLOHA L NÁKRES BOČNÍ STĚNY KRABÍČKY
OVLADAČE PRO VYVRTÁNÍ OTVORU PRO D-SUB 8
KONEKTOR**



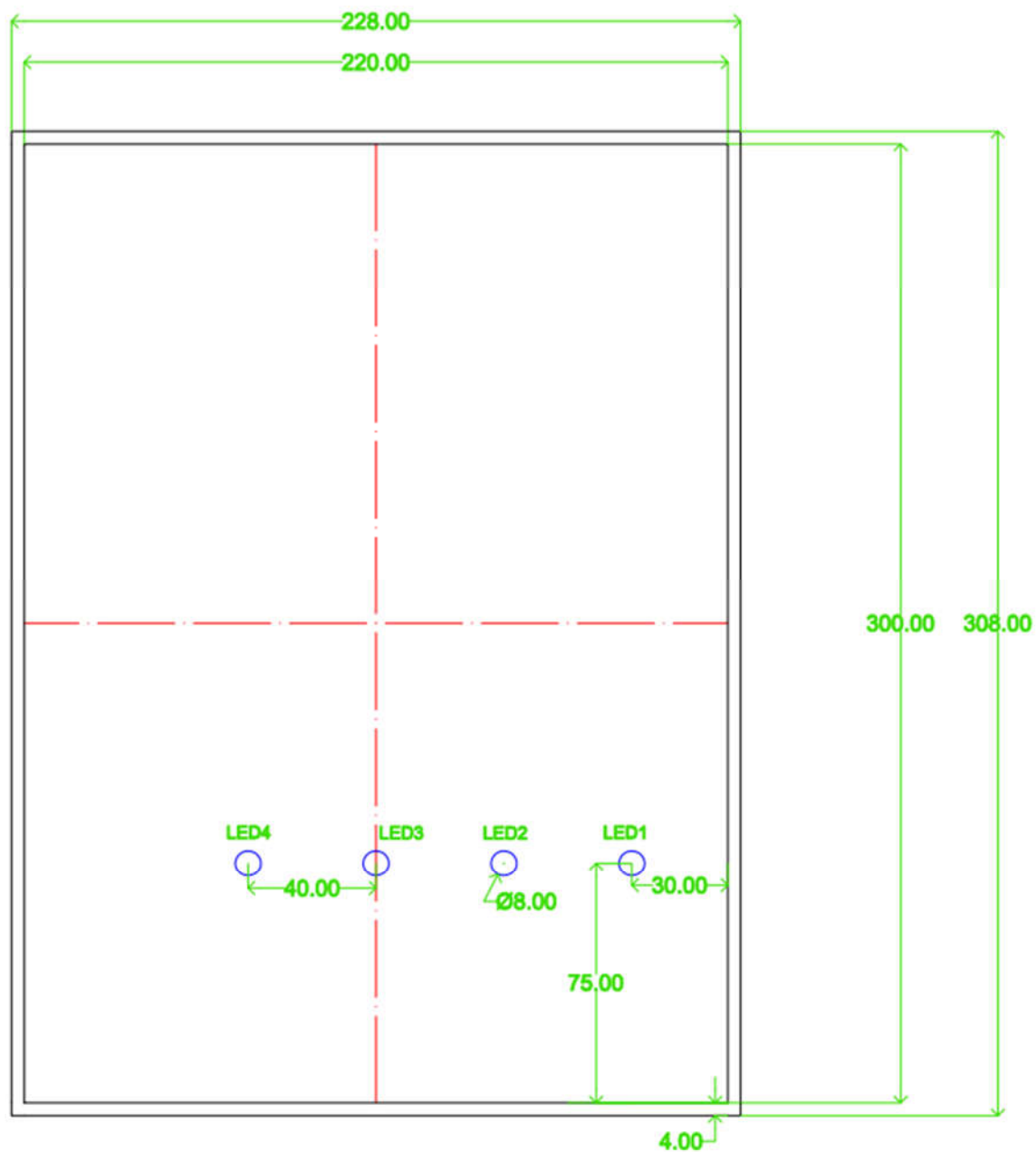
PŘÍLOHA M – NÁVRH ZÁKLADOVÉ DESKY (VRSTVA BOTTOM)



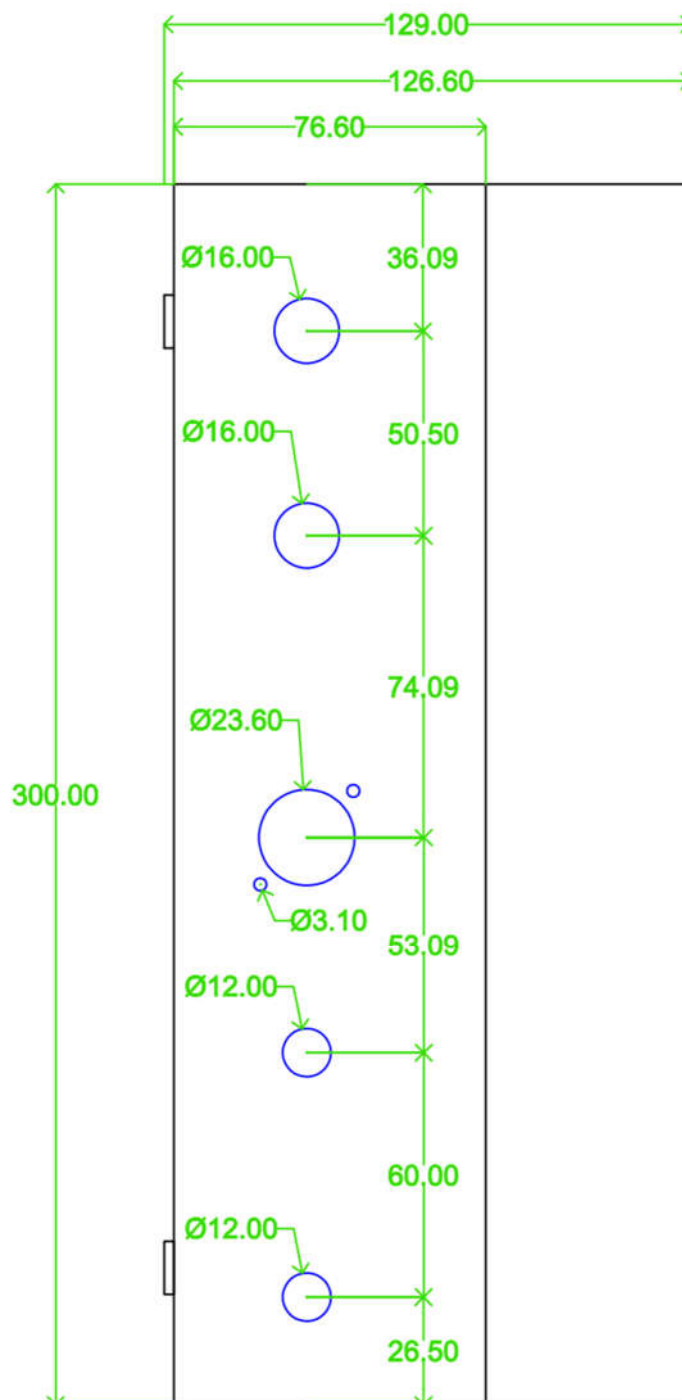
PŘÍLOHA N – NÁVRH ZÁKLADOVÉ DESKY (VRSTVA TOP)



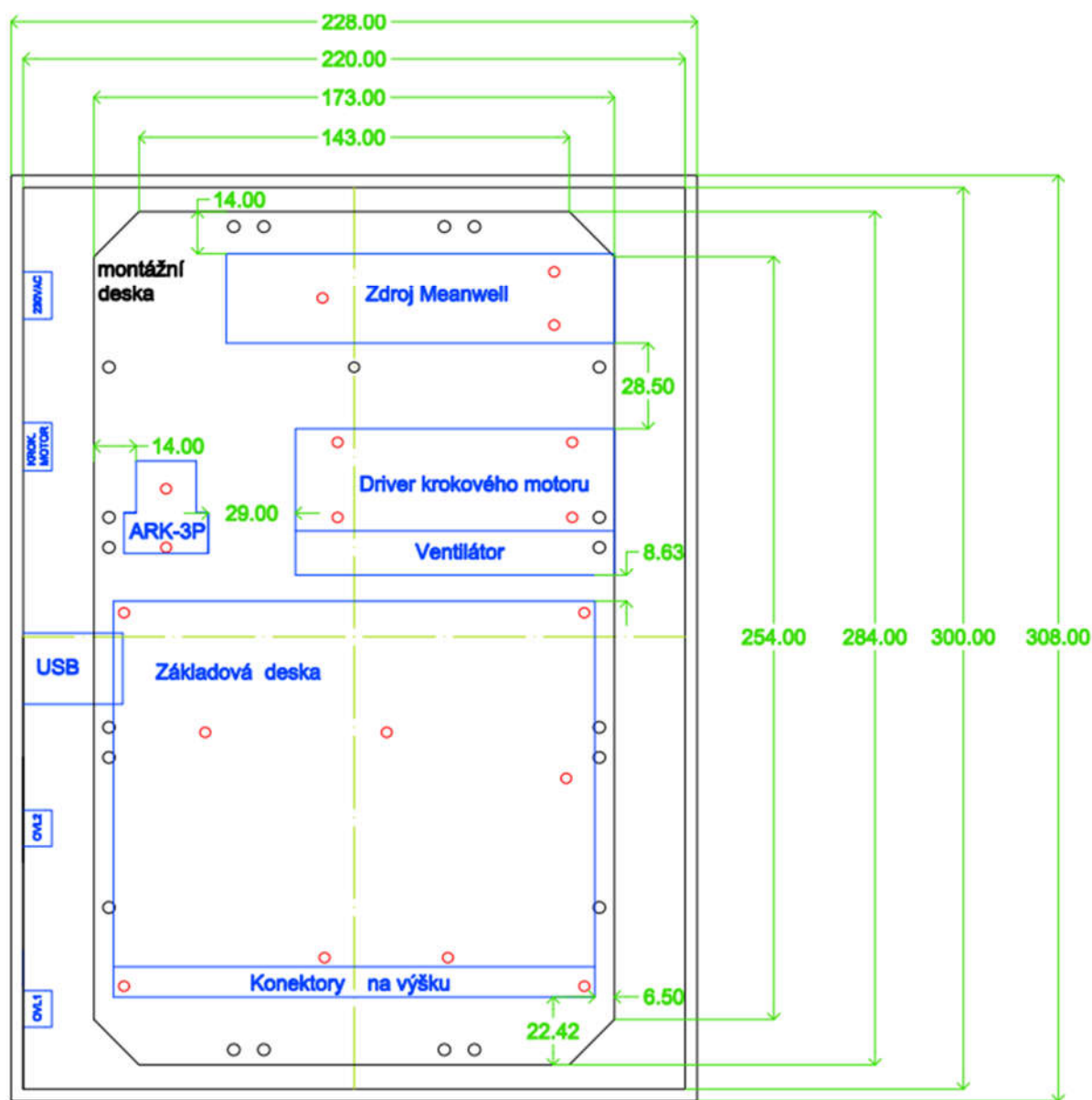
PŘÍLOHA O – NÁKRES VÍKA ZÁKLADOVÉ STANICE



PŘÍLOHA P – NÁKRES BOČNÍ STĚNY ZÁKLADOVÉ STANICE



PŘÍLOHA Q – ROZMÍSTĚNÍ KOMPONENT V ZÁKLADOVÉ STANICI



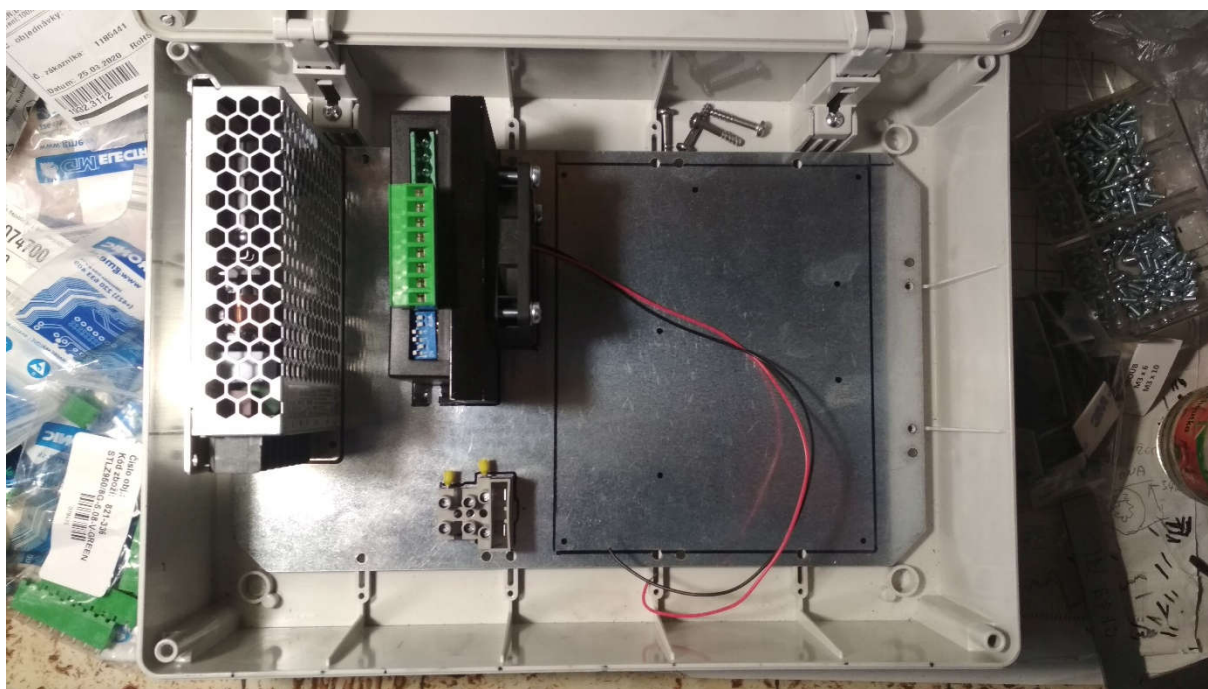
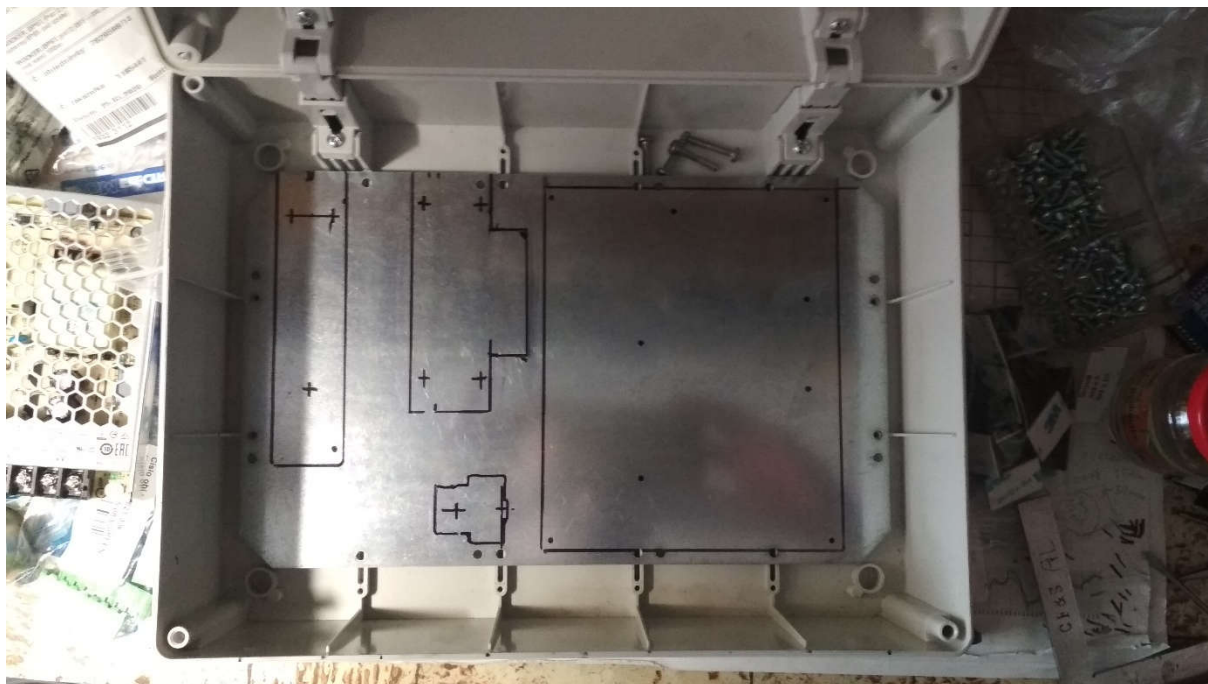
Pozn. USB konektor a základová deska se nepřekrývají, jsou v jiné výšce

Červené otvory – jsou otvory vyvrtané do montážní desky k přichycení komponenty na tuto desku.

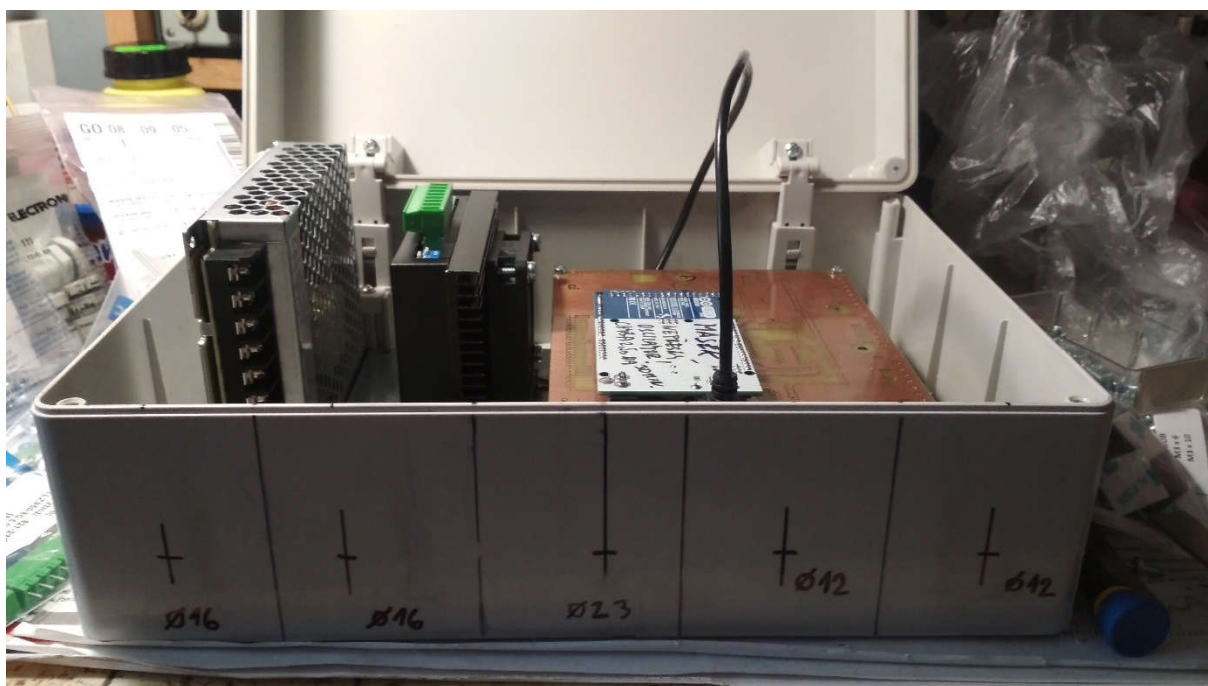
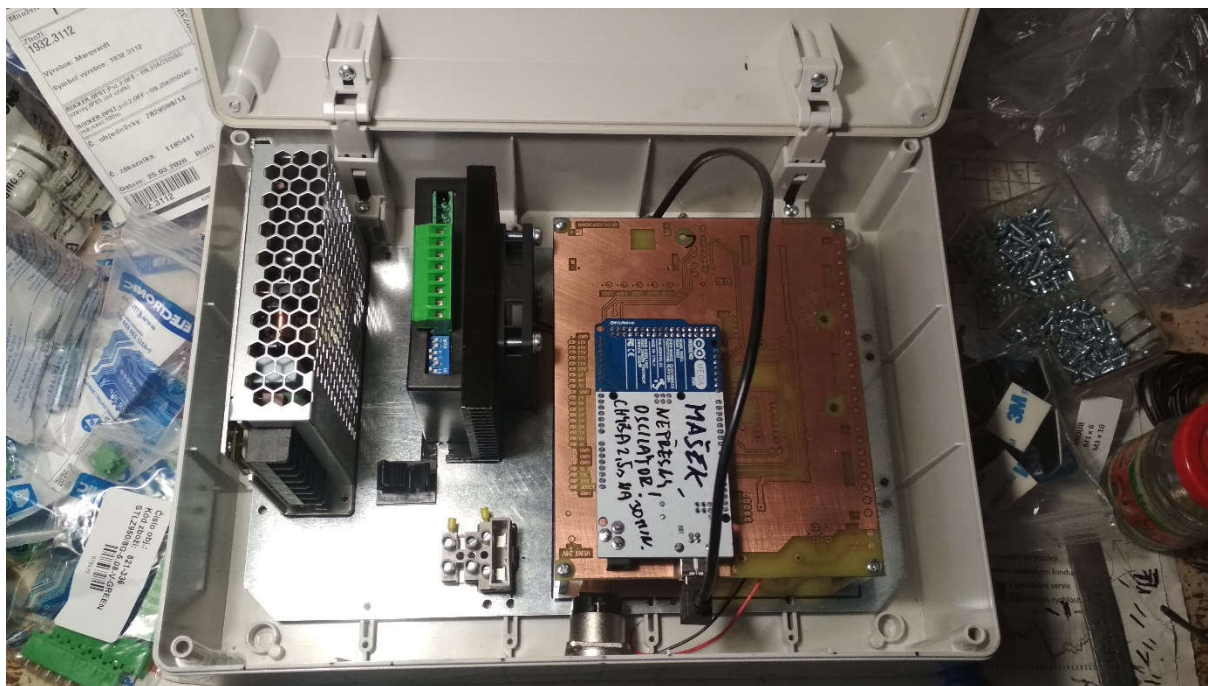
Bílé otvory – jsou otvory montážní desky.

ARK-3P – držák pojistky na 230 V AC.

PŘÍLOHA R – ZAKRESLENÍ A UMÍSTĚNÍ KOMPONENTŮ NA MONTÁŽNÍ DESKU DO ZÁKLADOVÉ STANICE



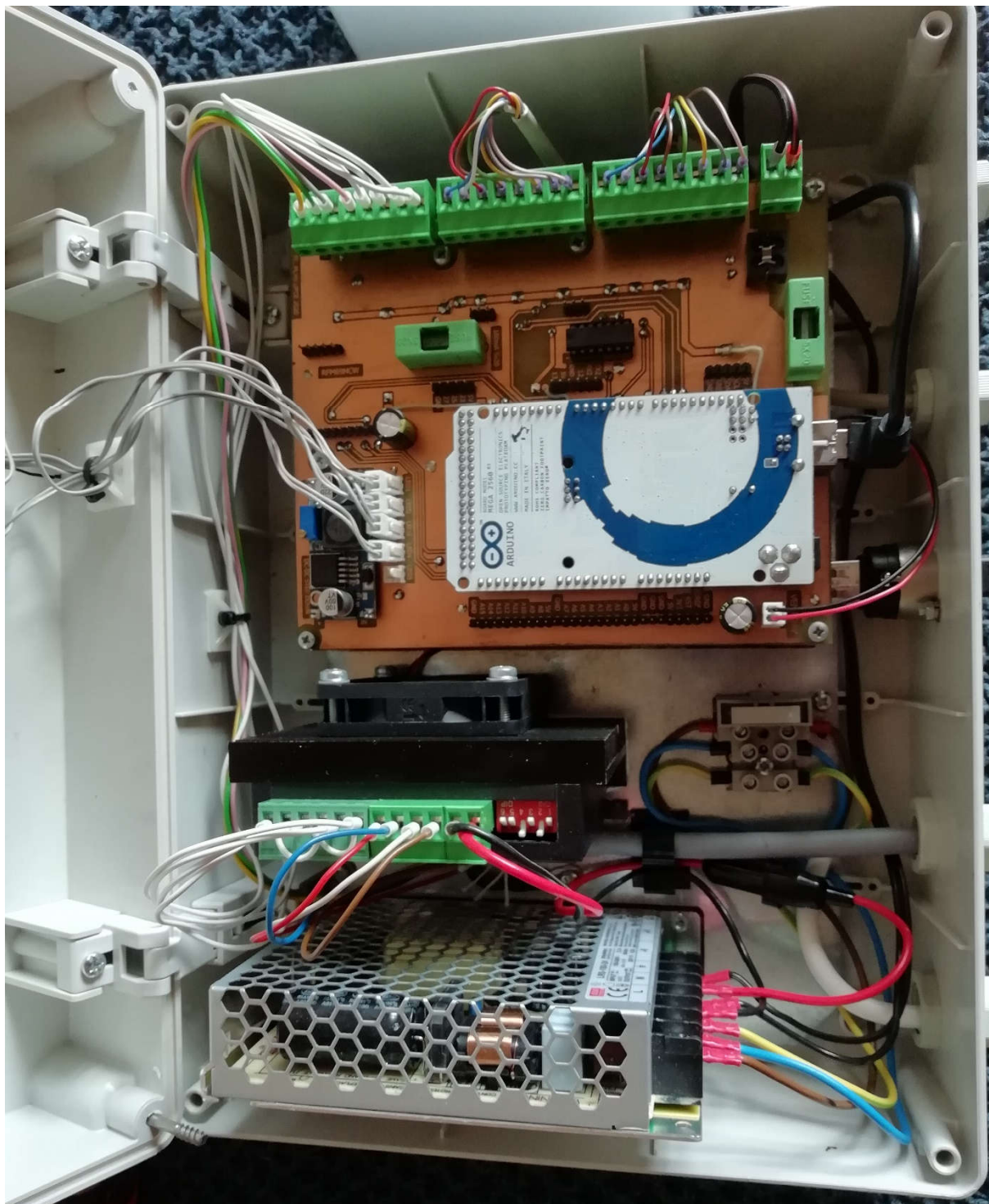
POKRAČOVÁNÍ PŘÍLOHY R



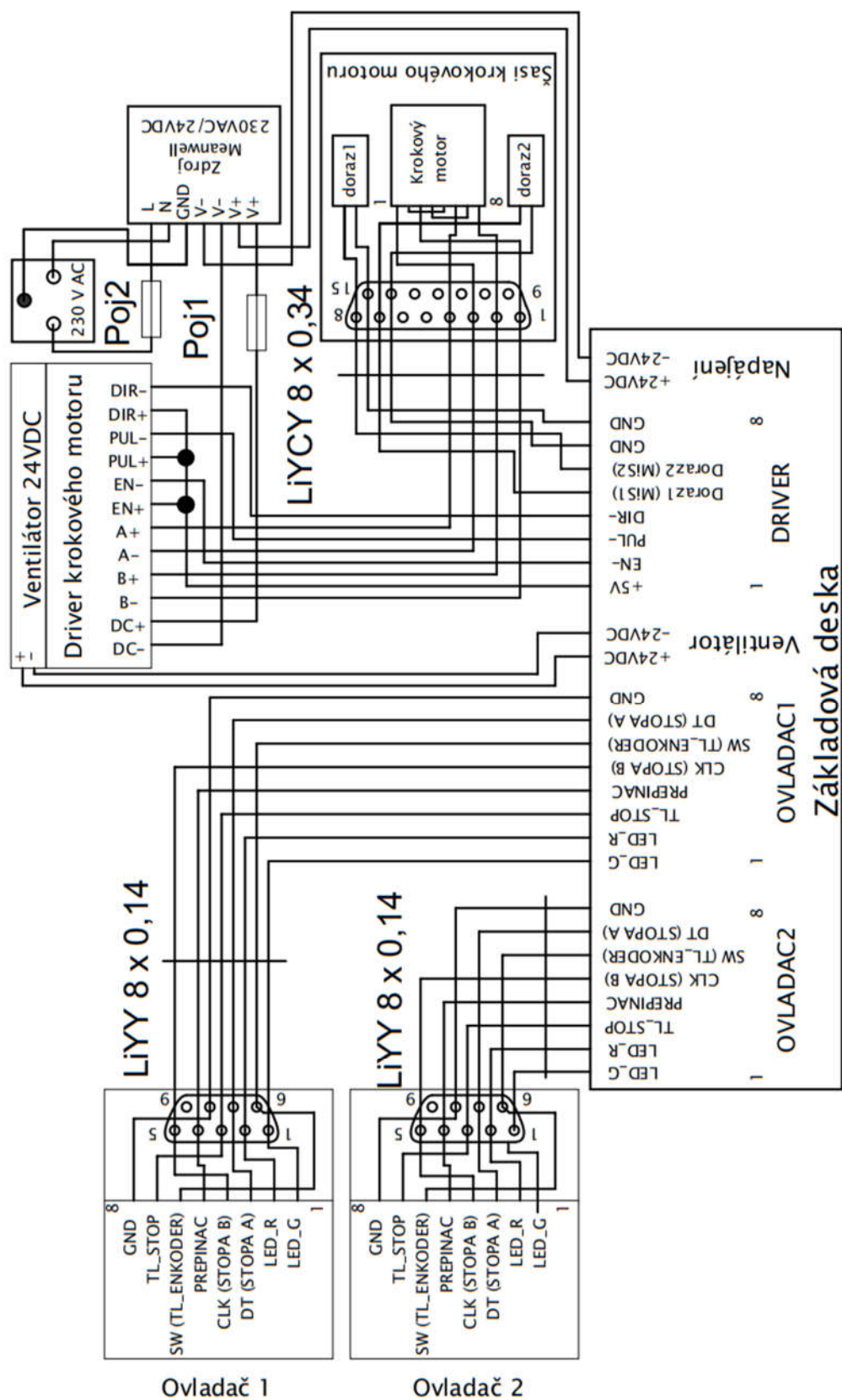
PŘÍLOHA S – FOTOGRAFIE HOTOVÉ ZÁKLADOVÉ STANICE



POKRAČOVÁNÍ PŘÍLOHY S



PŘÍLOHA T – FUNKČNÍ SCHÉMA SYSTÉMU ELEKTRONICKÉHO PLYNU



Poj1 – F 5 A; Poj2 – T 1,6 A