



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH A REALIZACE ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY
PNEUMATICKÉHO MANIPULÁTORU**

DESIGN OF CONTROL UNIT FOR PNEUMATIC MANIPULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Antonín Michl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Mašek

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Antonín Michl**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. Petr Mašek**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a realizace řídicí jednotky pneumatického manipulátoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá návrhem a realizací řídicí jednotky k pneumatickému modelu manipulátoru. Řídicí jednotka bude ovládat aktuátory manipulátoru a zpracovávat data z koncových snímačů polohy a snímače absolutní polohy manipulátoru. Manipulátor bude ovládán z navrženého programu pro PC.

Cíle diplomové práce:

Prostudujte možnosti řízení manipulátorů,
navrhněte vhodnou strukturu řídicí jednotky,
řídicí jednotku implementujte do modelu manipulátoru,
navrhněte software pro ovládání manipulátoru,
výsledné řešení prakticky otestujte.

Seznam literatury:

Gipta, A. K. and ARORA, S. K. (2009): Industrial automation and robotics. New Delhi: University Science Press. ISBN 9788131805923.

ROHNER, P. (2005): Pneumatic control for industrial automation. West Perth: HydraulicSupermarket.com. ISBN 0958149321.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací řídicí jednotky pneumatického manipulátoru. Řídicí jednotka je propojena s PC, na kterém je spuštěn speciální navržený software, pomocí kterého lze pohodlně manipulátor řídit. Řízení lze realizovat přímo uživatelem nebo automaticky pomocí programu.

Abstract

This thesis deals with design of control unit for pneumatic manipulator. The control unit is connect to PC, where the special designed software is running. This system allows you to easily control the manipulator. Controlling process can be realize directly by user or automatically by program.

Klíčová slova

Pneumatický manipulátor, Řídicí software, Řízení, mBed LPC1768, Festo

Keywords

Pneumatic manipulator, Control software, Controlling, mBed LPC1768, Festo

Prohlášení o originalitě

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27.05.2016

.....

podpis

Bibliografická citace

MICHL, A. *Návrh a realizace řídicí jednotky pneumatického manipulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Mašek.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Maškovi za jeho vstřícný přístup, trpělivost, cenné rady a připomínky týkající se zpracování diplomové práce, a za jeho cenný čas, který mi nad rámec svých povinností věnoval.

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	MOŽNOSTI ŘÍZENÍ MANIPULÁTORŮ	15
2.1	Základní typy řízení	15
2.2	Řídicí systémy	17
3	POPIS ŘÍZENÉHO MANIPULÁTORU	21
3.1	Zvolené značení a názvosloví	21
3.2	Komponenty soustavy	22
3.3	Identifikace vodičů a FluidSIM model	27
4	NÁVRH ŘÍZENÍ	31
4.1	Návrh hardware	31
4.1.1	Volba řídicí jednotky	31
4.1.2	Návrh napěťového přizpůsobení	32
4.1.3	Návrh DPS	36
4.2	Návrh software	37
4.2.1	Návrh řídicího software pro mBed	37
4.2.2	Návrh řídicího software pro PC	42
4.2.3	Zjednodušený návod na použití	46
5	PRAKTICKÁ REALIZACE	49
5.1	Výroba DPS	49
5.2	Kalibrace zesílení operačního zesilovače	52
5.3	Optimalizace parametrů regulátoru	52
6	EXPERIMENTY NA REÁLNÉ SOUSTAVĚ	53
7	ZÁVĚR	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM TABULEK	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM PŘÍLOH	61

1 ÚVOD

Automatizace, mechanizace a řízení jsou nezbytnou součástí dnešní doby a techniky. Mechanizace poskytuje lidem taková zařízení, která usnadňují jejich práci a tím zvyšují efektivitu daných procesů, automatizace společně s řízením pak snižují potřebu přítomnosti člověka, zvyšují přesnost, kvalitu a rychlost dané aplikace (dosažení předepsaných cílů). Jednou z hlavních výhod automatizace je také snížení rizika lidské chyby, resp. lidského selhání.

Tato práce se zabývá návrhem a realizací řídicí jednotky pneumatického manipulátoru. Jedná se o reálnou úlohu, kde se daný pneumatický manipulátor nachází v laboratoři Vysokého učení technického v Brně ústavu Automatizace a Informatiky. Manipulátor je složen z několika prvků (pneumatických motorů, elektroventilů, senzoriky a dalších komponent) dodaných výhradně od firmy Festo. Detailní popis, schéma řízené soustavy a jednotlivé prvky jsou uvedeny v kapitole 3. Manipulátor ale neobsahuje žádný řídicí systém.

Cílem této práce je takový řídicí systém navrhnout, realizovat, implementovat a otestovat.

Návrh vychází z obecných požadavků a předpokladů pro řídicí systém, kde největší prioritou je především bezpečnost. Navržený řídicí systém sestává ze zvolené řídicí jednotky (mBed LPC1768), příslušného software pro tuto jednotku (v jazyku C++) a daného software pro řízení z PC (v jazyku C#). Řídicí systém je navržen a naprogramován tak, aby umožnil přímé i automatické řízení. Samostatná řídicí jednotka je pak dále kompatibilní (lze ji ovládat) s jakýmkoli zařízením schopným komunikace prostřednictvím sběrnice USB. Další z funkcí této jednotky je možnost spuštění demonstrující ukázky bez nutnosti připojení řídicího software.

Celá sestava pak byla testována v laboratoři ústavu Automatizace a Informatiky VUT v Brně, kde byly ověřeny funkce řídicího systému.

2 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ MANIPULÁTORŮ

Tato kapitola pojednává o možnostech řízení. Pojem řízení se užívá především ve spojení s problematikou automatizace. Detailněji o teorii řízení a automatizaci pojednává zdroj [1].

2.1 Základní typy řízení

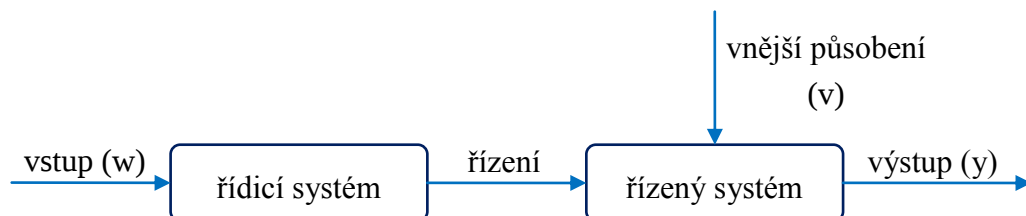
Řízení lze dělit na dvě základní problematiky:

- ovládání,
- regulace.

Dále je možné řízení dělit na:

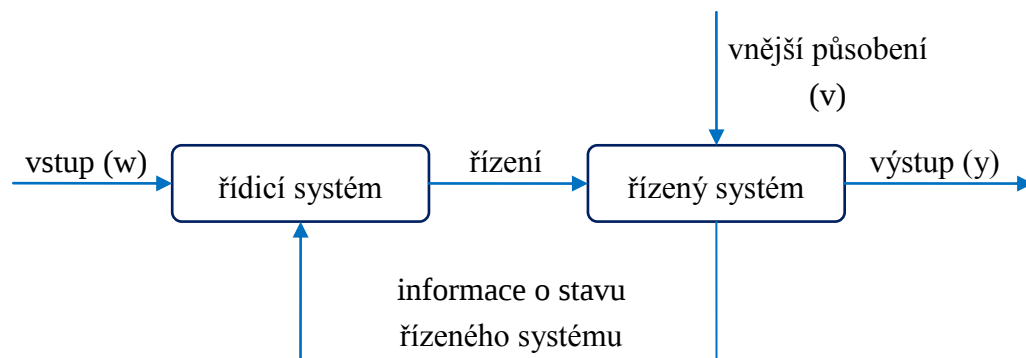
- optimální řízení,
- adaptivní řízení,
- učící se systémy,
- umělá inteligence,
- fuzzy řízení.

Optimální řízení, adaptivní řízení, učící se systémy a umělá inteligence spadají do tzv. vyšších forem řízení. Ovládání na Obr. 1 je definováno jako řízení bez zpětné vazby.



Obr. 1 Schéma ovládání.

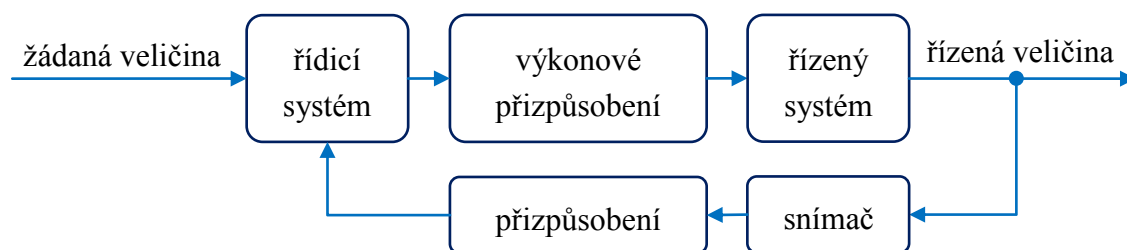
Regulace je řízení se zpětnou vazbou. Principem regulace je snižování regulační odchylky (e) vzniklé rozdílem požadované (w) a skutečné hodnoty (y), právě díky zpětnovazebnímu zapojení (Obr. 2).



Obr. 2 Schéma regulace.

Řízení může být přímé, tzn. řídicí proces probíhá bez přívodu energie (regulace výšky hladiny plovákem a pákou na základě mechanických principů). V opačném případě hovoříme o řízení nepřímém, kde je přívod energie nezbytný (většina dnešních aplikací) [1].

Na obrázku Obr. 3 je uvedeno schéma regulačního obvodu, které detailněji zobrazuje princip regulace. Z toho principu pak také vychází tato práce pro návrh řídicího systému.



Obr. 3 Schéma regulačního obvodu.

Optimální řízení je řízení, které dosáhne předepsaného cíle optimálně podle určitého daného kritéria (například v nejkratším čase, s nejmenším překmitem, minimální regulační plochou ad.) [1].

Adaptivní řízení mění během regulace část nebo strukturu systému (nejčastěji parametry regulátoru) tak, aby proces řízení probíhal neustále optimálně vzhledem k určitému kritériu. Nejčastějším provedením je adaptivní řízení s modelem regulované soustavy nebo s modelem uzavřeného regulačního obvodu. Učící se systémy a umělou inteligenci lze v tomto kontextu chápat jako vylepšenou formu adaptivního řízení o paměť a schopnost učení [1].

Fuzzy řízení je systém založený na pravidlech využívající expertní znalosti. Mezi jeho hlavní části patří báze pravidel, báze dat, báze faktů, inferenční mechanismus, metody fuzifikace a defuzifikace. Výhodou je možnost práce s lingvistickými proměnnými („malá rychlost“, „střední výkon“, „vysoká teplota“). Fuzzy regulátory jsou vhodné například pro řízení nelineárních soustav [1].

2.2 Řídicí systémy

Systém je definován jako soustava komponent, které mají mezi sebou určité vazby a jako celek plní určitou funkci. Základem řídicích systémů jsou vstupy a výstupy, které bývají nejčastěji:

- analogové (napětí, proud, odpor),
- digitální,
- sběrníkové.

Pro řízení zařízení, u kterých je plánována kusová nebo malosériová výroba, je vhodné použít univerzální nebo již hotové řešení řízení (především z finančního hlediska, protože optimalizace a vývoj jsou nákladné). Jako vhodné řídicí systémy pro takovéto aplikace lze uvést například [2]:

- řídicí jednotky a programovatelné regulátory,
- PC rozšířené o speciální hardware,
- průmyslová PC,
- programovatelné automaty:
 - PLC,
 - PAC.

Pro řízení zařízení, u kterých je předpokládána hromadná sériová výroba, lze uvést jako vhodné například [2]:

- kompaktní a vestavné (emBedded) systémy,
- mikrořadiče.

Programovatelné regulátory (Obr. 4) jsou hotová řešení, často pro konkrétní úlohy, která mohou být v řadě aplikací vhodným řídicím členem. Jsou relativně levné, dostupné a pro běžné regulační úlohy dostačující. Jako příklad lze uvést použití pro automatizaci budov nebo pro regulaci teploty programovatelným regulátorem (například v pecích, klimatizační technice nebo při řízení technologických procesů) [3][4].



Obr. 4 Ukázka programovatelného regulátoru a regulátoru teploty [4][2].

PC je možné rozšířit o speciální hardware, pomocí kterého jej pak lze používat jako řídicí jednotku. DAQ (Data Acquisition) - takto je označen sběr dat, rozšiřující karty se připojují pomocí rozhraní nejčastěji:

- PCI,
- PCIe,
- USB,
- LAN,
- Wi-Fi.

Výhodou takového řešení je univerzálnost a rychlost vývoje aplikace. Nevýhodou je ale cena a jejich použití je spíše vhodné jen pro laboratorní a kancelářské podmínky [2].

Dalším možným řídicím členem mohou být průmyslová PC, která jsou konstruována pro průmyslová prostředí (prašnost, vlhkost, vibrace ad.). Jsou obdobná klasickým PC, ale vyznačují se vyšší odolností, spolehlivostí a nižší spotřebou. Jako jejich nevýhodu lze uvést pořizovací náklady. Příkladem průmyslových PC jsou například zobrazovací jednotky (HMI), PXI/PXIe systémy (modulární přístroje pro měření a řízení viz Obr. 5, extrémní výkon a spolehlivost) [2].



Obr. 5 Ukázka PXI [5].

PLC (Programmable Logic Controller) jsou vhodné pro řízení jednodušších procesů, jednotlivých zařízení, výrobních linek, manipulátorů ad.. Velmi často jsou koncipována jako modulární zařízení a jejich vhodnou aplikací je logické řízení. Lze je však použít i pro realizaci složitějších úloh v daných případech. PAC (Programmable Automation Controller) jsou velmi podobná PLC (Obr. 6), ale mají zpravidla oproti nim vyšší výkon a lze je obecněji programovat. Výhodou je možnost realizace připojení několika odlišných rozhraní (RS-232, Ethernet ad.) [2].



Obr. 6 Ukázka PLC [6].

Mikrořadiče jsou jednočipové mikropočítače (programovatelné sekvenční automaty sestavené z integrovaných obvodů vysoké složitosti). Obsahují ALU (Aritmeticko Logická Jednotka), paměti (pro data a program), časovač/čítač, eventuálně A/D a D/A převodníky, PWM (Pulse Width Modulation) výstupy, komunikační rozhraní ad.. Rozšířením mikrořadičů o další obvody lze získat univerzální řídicí systém (jelikož chování je závislé na daném programu), který je vhodný pro danou aplikaci (obvody související s přizpůsobením umožní zásah do řízené soustavy). Ukázka možného provedení mikrořadiče (pouzdra) je uvedena na Obr. 7. Jako časté aplikace mikrořadičů lze uvést [2][7]:

- datalogery a zobrazovače,
- programovatelné regulátory a řídicí jednotky,
- programovatelné automaty.

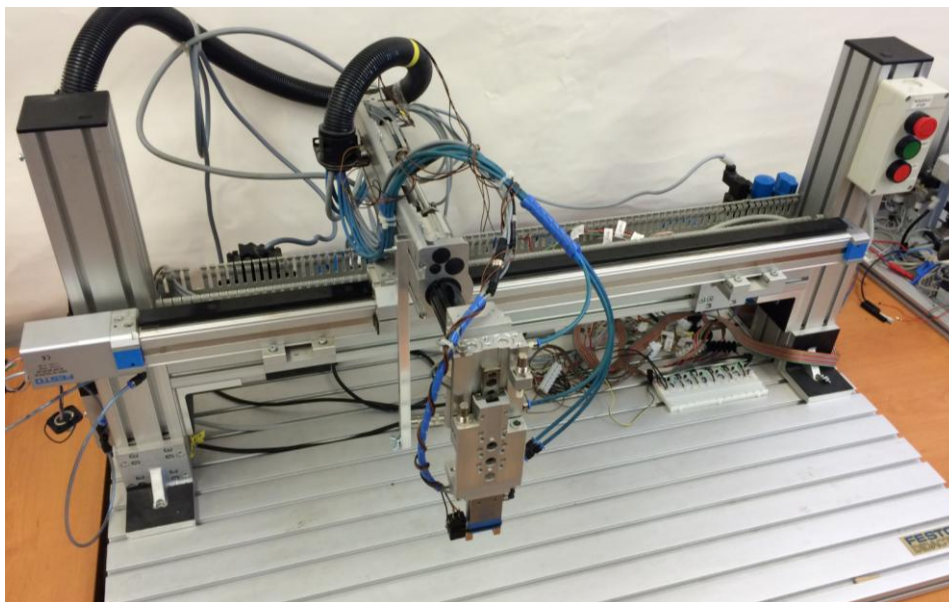


Obr. 7 Ukázka mikrořadiče [8].

Volba řídicí jednotky pro danou řízenou soustavu (manipulátor) byla provedena v kapitole 4.1.1. Jako řídicí člen byl zvolen mBed LPC1768.

3 POPIS ŘÍZENÉHO MANIPULÁTORU

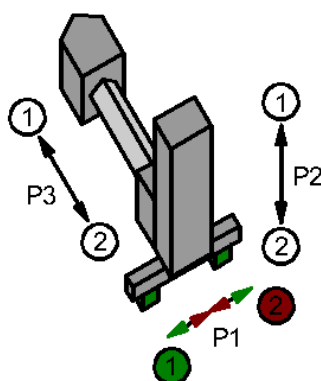
Navržený řídicí systém je určen pro konkrétní daný pneumatický manipulátor. V této kapitole jsou popsány jednotlivé komponenty, z kterých se daná soustava skládá. Ilustrační foto daného manipulátoru je uvedeno na Obr. 8.



Obr. 8 Ukázka řízeného manipulátoru.

Jedná se o tříosý manipulátor, který je vybaven chapadlem s čelistmi. Z obrázku Obr. 8 je patrné, že v jedné ose je umožněn lineární posuv a ve zbývajících osách jsou vždy dvě diskretní polohy. Pro další srozumitelnost textu budou zavedeny následující pojmy a označení poloh, které budou dále užívány.

3.1 Zvolené značení a názvosloví



Obr. 9 Schéma zvoleného označení stavů.

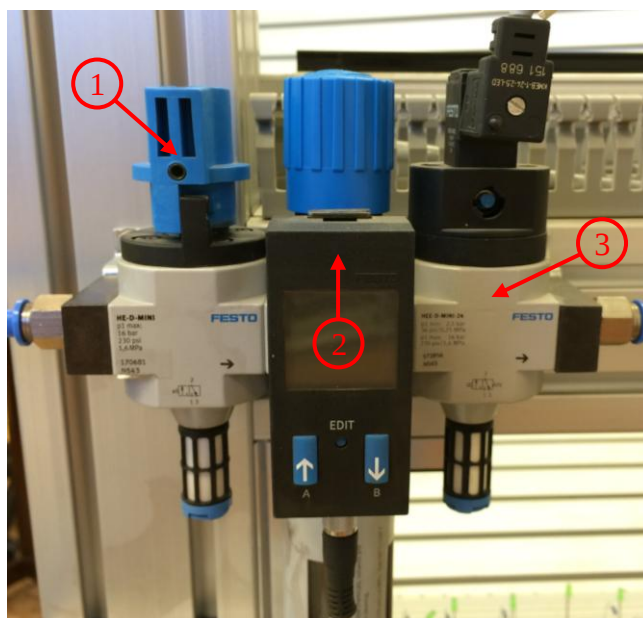
Hodnota polohy lineárního pohybu je diskretizována do zvoleného rozsahu a bude dále označována zkratkou „PSD“ (Position Discreet). Pohyb v jednotlivých dalších osách bude dále značen ve zvoleném formátu „PX-Y“, kde písmeno „X“ značí daný pohyb

v dané ose a příslušným číslem „Y“ odpovídající z Obr. 9 danému stavu zvoleného pohybu. Termínem „jezdec“ je v tomto textu označena ta část, které je umožněn posuv po rámu, ilustrace jezdce je na Obr. 9. Velikost písmen se ve voleném označení nezohledňuje. Příklad označení aktuálního stavu manipulátoru z předchozího obrázku je tedy P1-1, P2-1, P3-2. Pohyb P1 bude také označován jako „čelisti“.

3.2 Komponenty soustavy

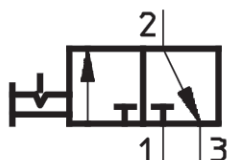
Jak již bylo uvedeno, jedná se o pneumatický manipulátor. Přívod vzduchu je realizován přes jednotku úpravy vzduchu (Obr. 10) sestávající se ze tří částí:

- manuálně ovládaný ventil (On/Off) (označeno č.1),
- redukční ventil s filtrem (označeno č.2),
- elektricky ovládaný ventil (On/Off) (označeno č.3).



Obr. 10 Jednotka pro úpravu vzduchu.

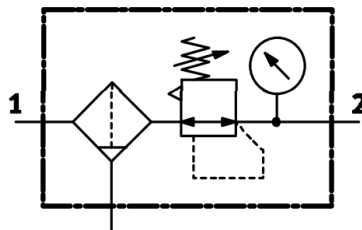
Manuálně ovládaný ventil FESTO HE-D-MINI (170681) je připojen ke zdroji tlakového vzduchu v laboratoři. Funkce ventilu je 3/2 impulsní. Provozní tlak je (0 až 16) bar [9], schematická značka je uvedena na Obr. 11. Tlak napájecího vzduchu v laboratoři je 8 bar.



Obr. 11 Schéma manuálně ovládaného ventilu [9].

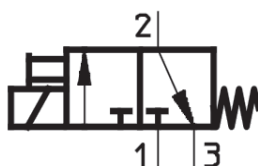
Redukční ventil s filtrem FESTO LFR-D-5M-MINI (162719) slouží k úpravě tlaku vzduchu. Provozní tlak je (1 až 16) bar, rozsah řízeného tlaku je

(0,5 až 12) bar [10]. Ventil je vybaven digitálním manometrem SDE1-D10-G2-R18-C-P1-M8 a ručním odpouštěním kondenzátu. Schéma je uvedeno na Obr. 12. Výstupem digitálního manometru je logická 1 nebo 0 reprezentována napětovým signálem 24 V vůči zemi při tlaku v systému vyšším, než je na manometru nastavený jako referenční. V opačném případě je výstup 0 V [11].



Obr. 12 Schéma redukčního ventilu s filtrem [12].

Elektricky ovládaný ventil FESTO HEE-D-MINI-24 (172956) je napájen 24 V (3 W). Jedná se o nepřímý řízený ventil s funkcí 3/2 monostabilní, v klidovém stavu (tzn. bez napájení) je uzavřen. Provozní tlak je (2,5 až 16) bar. Schéma je uvedeno na Obr. 13 [13].



Obr. 13 Schéma elektricky ovládaného ventilu [13].

Dále je vzduch veden do dvoucestného rozbočovače, ze kterého je veden do ventilového terminálu FESTO CPV 10-VI (18200), ze kterého jsou dále vedeny hadice k pneumotorům příslušných pohybů P1, P2 a P3. Ve všech případech (P1, P2 a P3) se jedná o dvojčinné pneumotory. Rozdíl je v jejich řízení, který bude dále popsán. Terminál (Obr. 14) je omezen na 8 ventilových pozic. V daném případě je použito 5. Funkce terminálu je odvozena dle užitých jednotlivých ventilů. První a třetí pozice je osazena elektromagnetickým ventilem CPV10-M1H-5JS-M7 [14].



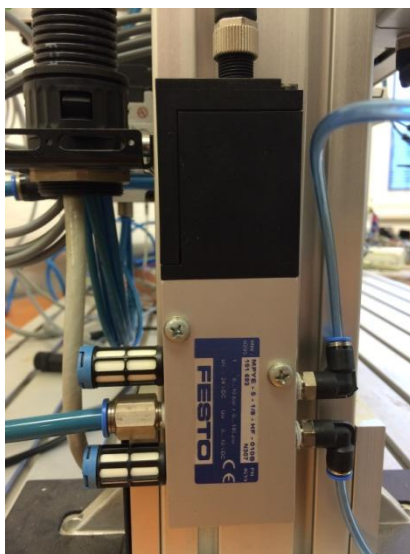
Obr. 14 Ventilový terminál.

Jedná se o nepřímo ovládané 5/2 impulsní ventily, které jsou vybaveny (lze vidět z předchozího obrázku) pomocným ručním ovládáním tlačítkem s aretací. Tyto ventily řídí pohyby P1 a P3. Řídicí tlak je (3 až 8) bar a provozní tlak (-0,9 až 10) bar. Elektrický příkon 0,46 W, ovládací napětí 24 V. Druhá pozice terminálu je osazena nepřímo řízeným elektromagnetickým ventilem CPV-10-M1H-5LS-M7 s pomocným ručním ovládáním tlačítkem s aretací (Obr. 15) a tento ventil řídí pohyb P2 [15][16].



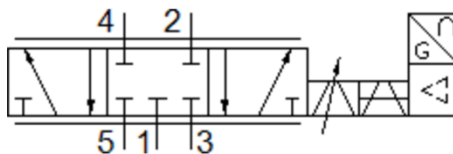
Obr. 15 Elektromagnetický ventil pro terminál CPV [17].

Jedná se o ventil s funkcí 5/2 monostabilní pro provozní tlak (-0,9 až 10) bar a pro řídicí tlak (3 až 8) bar. Ovládání a příkon jsou stejné jako u předchozích uvedených ventilů. Poslední pozice terminálu je zaslepena rezervní deskou CPV10-RZP [18].



Obr. 16 Proporcionální průtokový ventil.

Z již zmíněného dvoucestného rozbočovače je vzduch také veden do proporcionálního průtokového ventilu (Obr. 16) MPYE-5-1/8-HF-010-B (151693). Provozní napětí je předepsáno dle dokumentace (17 až 30) V.



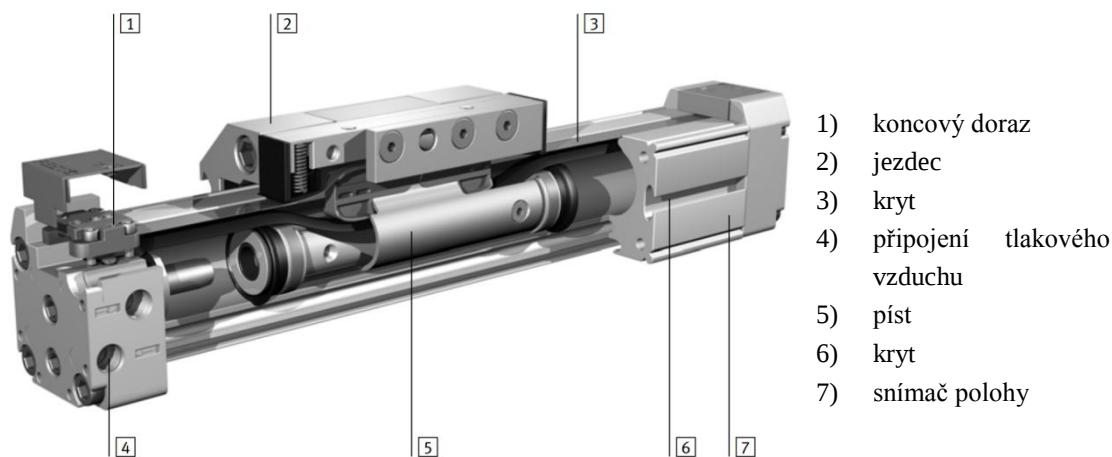
Obr. 17 Schéma proporcionálního ventilu [17].

Řízení je realizováno pomocí napěťového signálu (0 až 10) V dle Obr. 18, kde pro hodnoty řídicího signálu 5 V odpovídá stav ventilu střední uzavřené poloze, hodnota 0 V znamená plné otevření na jednu stranu a hodnota 10 V značí plné otevření průtoku na stranu druhou. Při odpojení napájení dojde automaticky k nastavení do uzavřené střední polohy. Jmenovitá světlost je 6 mm a normální jmenovitý průtok je 700 l/min. Schematická značka je uvedena na Obr. 17 [19].

Setpoint specification as voltage value V_w as current value I_w	5 V 12 mA	Between 0 V and 5 V Between 4 mA and 12 mA	Between 5 V and 10 V Between 12 mA and 20 mA
Flow rate (idealised)	Mid-position in the range of the flat zone of the flow setpoint diagram (leakage rate).	Q max. 0 Voltage (current) 5 V (12 mA)	Q max. 5 V (12 mA) Voltage (current) 10 V (20 mA)
Change in flow rate	Flow rate blocked	Flow rate rises at outlet 2	Flow rate rises at outlet 4
Connections	All connections closed	Pressurisation: 1 → 2 Exhaust: 4 → 5	Pressurisation: 1 → 4 Exhaust: 2 → 3
Valve slide motion	Mid-position (unchanged)	Towards inspection window 7	Away from inspection window 7

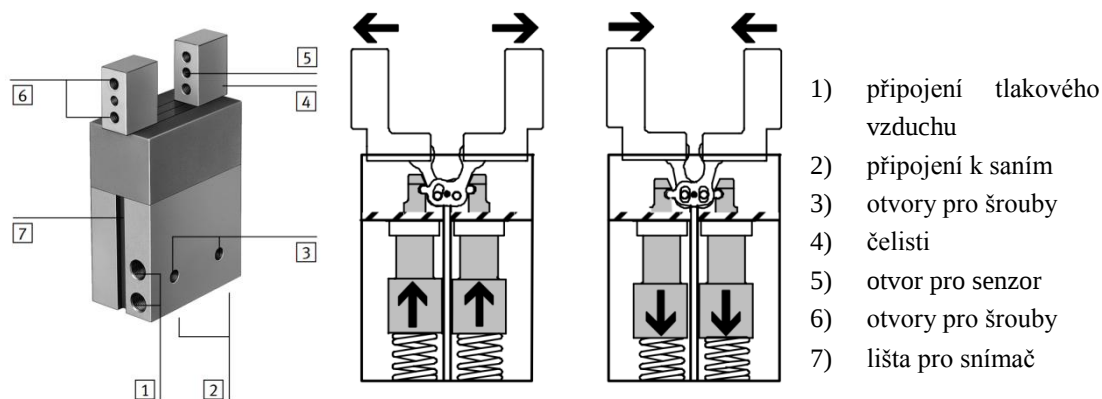
Obr. 18 Závislost průtoku na řídicím signálu [19].

Proporcionální ventil řídí pohon DGPIIL-25-750-PPV-B-KF-AIF-GK-SV-AH (175134). Jedná se o přímočarý dvojčinný pneumatický pohon (Obr. 19 Ilustrace lineárního pohonu [20].) s udávaným provozním tlakem (4 až 8) bar a teoretickou silou v obou směrech 295 N (při tlaku 6 bar). Pohon je vybaven absolutním odměřováním s rozhraním CAN (protokol AIF). Průměr pístu činí 25 mm, požadované připojení tlakového vzduchu je pro tento průměr pístu určeno QS-G1/8-8 (186098). Maximální udávaná rychlost činí 3 m/s. Festo pro tento pohon předepisuje nutnost použití „axis controller“ a dodává jeho dvě možná provedení. Axis controller SPC200, s nímž je udávaná přesnost polohování 14 mm, a axis controller SPC11, který uvádí přesnost polohování 2 mm [20][21].



Obr. 19 Ilustrace lineárního pohonu [20].

Pneumotory pro pohyby P1 a P3 se nepodařilo identifikovat (nemají označení), pro pohyb P2 je užit dvojčinný pneumotor (saně) SLT-16-50-P-A-CC (170587). Jedná se o posuvovou desku s uvedeným zdvihem 50 mm. Provozní tlak je udán (1 až 10) bar [22]. Koncové polohy všech pohybů jsou snímány pomocí čidel SME-8-K-LED-24 (150855). Jedná se principiálně o jazýčková relé se spínáním výstupem. Maximální spínaný výkon je uveden 10 W. Rozsah provozního napětí je (12 až 30) V [23].

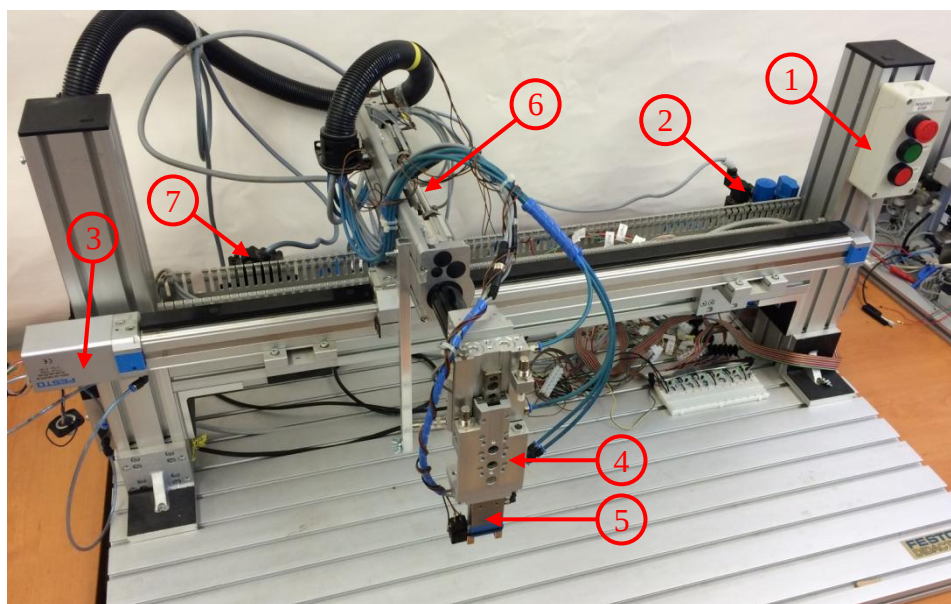


Obr. 20 Princip čelistí [24].

Saně jsou osazeny chapadlem (čelistmi) HGP-10-A (161825). Provozní tlak je udán (2 až 8) bar. Maximální rozteč při otevření čelistí činí 40 mm. Síla při zavření (při tlaku 6 bar) je 90 N. Ukázka čelistí a jejich principu je uvedena na Obr. 20 [24].

Na rámu manipulátoru je umístěn panel s tlačítky. Jsou zde umístěna tlačítka: central stop, stop (červené tlačítko rozpínací) a start (zelené tlačítko spínací).

Na Obr. 21 je uvedena řízená soustava s číselnými odkazy na jednotlivé, dříve zmíněné, komponenty. Označení je voleno: 1 – panel s tlačítky, 2 – jednotka pro úpravu vzduchu, 3 – lineární pohon, 4 – saně pro vertikální posuv, 5 – chapadlo (čelisti), 6 - pohon pro pohyb P3, 7 – ventilový terminál.



Obr. 21 Ukázka řízené soustavy.

3.3 Identifikace vodičů a FluidSIM model

Následující tabulka Tab. 1 uvádí funkci a označení jednotlivých vodičů vyvedených z řízené soustavy. Vodiče jsou rozděleny do sedmi základních svazků. Přivedením řídicího napětí na bezpečnostní ventil (24 V) dojde k zapnutí přívodu vzduchu do soustavy. Tlakový senzor je napájen 24 V a pokud hodnota aktuálního tlaku v systému převyšuje hodnotu referenční (nastavitelnou), je na jeho výstupu taktéž 24 V. Problematické je umístění tohoto senzoru, jelikož při uzavření bezpečnostního ventilu bude tento snímač tlaku stále hlásit logickou 1, což může být v implementaci řídicího software komplikací.

Pokud přivedeme řídicí napětí na modrý vodič 1Y2, čelisti se uzavřou (P1-2) a v této poloze setrvávají i po odpojení řídicího napětí, ovšem pro přepnutí ventilu musí být v systému dostatečný tlak, protože se jedná o nepřímě řízené ventily. Čelisti otevřeme připojením řídicího napětí na růžový vodič 1Y1, tím dosáhneme stavu P1-1, chování ventilu je stejné jako při zavření čelistí. Obdobné chování lze očekávat v případě řízení pohybu P3. Připojením řídicího napětí na bílý vodič 3Y1 dojde k vysunutí jezdcy na stav P3-2. Opět je zde nutná podmínka dostatečného tlaku v systému. Po úspěšném přepnutí ventilu tento stav setrvává i po odpojení řídicího napětí. Přivedením řídicího napětí na zelený vodič 3Y2 bude v případě úspěšného přepnutí ventilu dosaženo stavu P3-1. Důležité je zabránit případu, kdy bude řídicí napětí přivedeno současně na 1Y1 a 1Y2 nebo 3Y1 a 3Y2. Pro řízení pohybu P2 slouží žlutý vodič 2Y1, v případě přivedení řídicího napětí a dostatečném tlaku v systému, bude dosaženo stavu P2-2, ovšem po odpojení řídicího napětí bude automaticky ventil přepnut zpět a bude dosaženo stavu P2-1. Řízení proporcionálního ventilu je

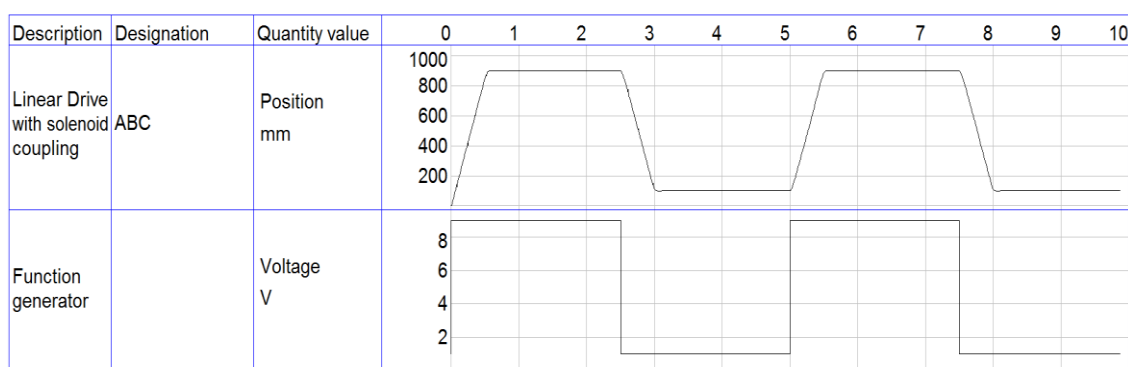
realizováno pomocí modrého vodiče přivedením řídicího napětí v rozsahu (0 až 10) V viz Obr. 18.

Tab. 1 Identifikace vodičů.

svazek	barva	označení vodičů	poznámka
1 (hlavní panel)	červená	24V	propojeno s druhou červenou
	červená	24V	vstup tlačítka central s. a stop
	zelená	start	vstup tlačítka start
	čirá	start	výstup tlačítka start
	čirá	stop	výstup tlačítka stop
	čirá	central stop	výstup tlačítka central stop
2 (bezpečnostní ventil)	černá	central stop	napájení 24 V
	černá	GND	0 V
	zelenožlutá	GND	nepoužito
3 (tlakový senzor)	hnědá	tlakový spínač 24V	napájení 24 V
	modrá	tlakový spínač 0V	0 V
	černá	tlakový spínač	výstupní napěťový signál
4 (snímače)	červená	24V	napájení 24 V
	zelená	GND	0 V
	čirá	S3.1	výstupní napěťový signál
	čirá	S3.2	výstupní napěťový signál
5 (snímače)	hnědozelená	GND	0 V
	žlutobílá	GND	0 V
	zelenobílá	24V	napájení 24 V
	bílá	S1.1	výstupní napěťový signál
	hnědá	S1.2	výstupní napěťový signál
	zelená	S2.1	výstupní napěťový signál
	žlutá	S2.2	výstupní napěťový signál
6 (ventily)	černá	GND	0 V
	modrá	1Y2	řídící napájení 24 V
	růžová	1Y1	řídící napájení 24 V
	zelená	3Y2	řídící napájení 24 V
	bílá	3Y1	řídící napájení 24 V
	žlutá	2Y1	řídící napájení 24 V

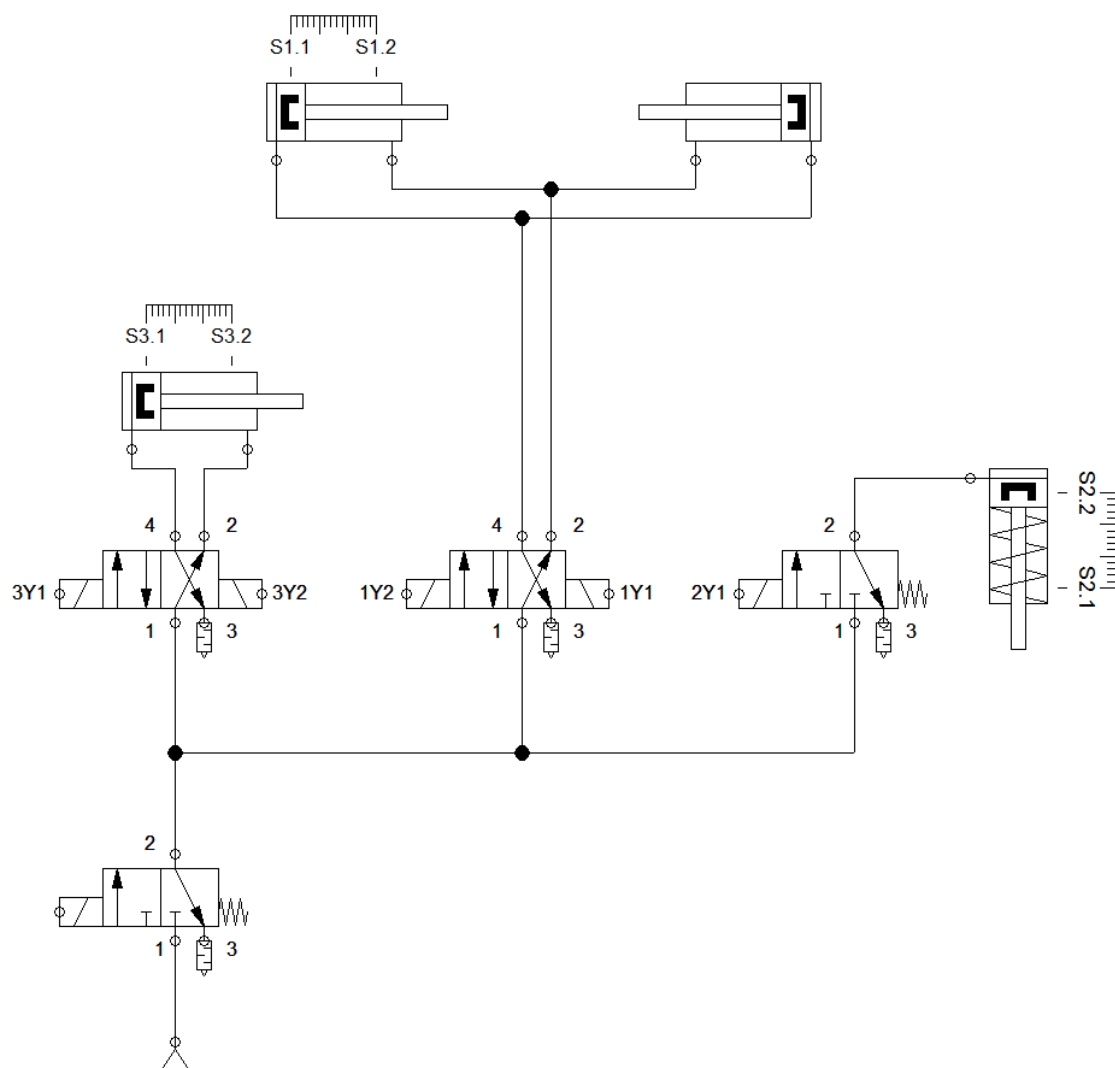
7 (proporcionální ventil)	hnědá	24V	napájení 24 V
	bílá	0V	0 V
	modrá	U _w	vstup řídicího napěťového signálu (0 až 10) V

V prostředí FluidSIM byl vytvořen model řízené soustavy, kde je simulováno jeho řízení a regulace polohy lineárního pohonu včetně parametrů regulátoru. Model je obsažen v digitální příloze této práce. Ukázka modelu je ilustrována na Obr. 23. Simulovaný průběh regulace polohy PID regulátorem v závislosti na čase je uveden na Obr. 22 (první řádek představuje odezvu, druhý skokové změny žádané veličiny).



Obr. 22 Ukázka simulovaného průběhu regulace polohy.

Pro simulaci bylo experimentálně zvoleno nastavení regulátoru s následujícími parametry: hodnota zesílení byla nastavena na 25, integrační člen byl vyřazen a hodnota zesílení derivační složky byla volena 500.



Obr. 23 Ukázka modelu řízené soustavy.

Z předchozího modelu lze odvodit pozice koncových snímačů. Stav pohybu P1-1 (čelisti otevřeny) je signalizován napětím 24 V na bílém vodiči S1.1, stav P1-2 (čelisti zavřeny) bude signalizován stejnou hodnotou napětí na hnědém vodiči S1.2. Pro stav P2-1 bude výstupní napěťový signál (24 V) na zeleném vodiči S2.1 a pro stav P2-2 na žlutém vodiči S2.2. Obdobně pro stavy P3-1 bude odpovídat signál na vodiči S3.1 a pro stav P3-2 bude příslušný signál na vodiči S3.2. Informace o poloze jezdce je obsažena v CAN zprávě. Ukázka tvaru přichozí možné CAN zprávy je uvedena v Tab. 2.

Tab. 2 Ukázka možné CAN zprávy s informací o poloze.

identifikátor	délka	D0	D1	D2	D3	D4	D5
id	6	Highbyte pozice	Med.byte pozice	Lowbyte pozice	stav	Highbyte rychlost	Lowbyte rychlost

4 NÁVRH ŘÍZENÍ

V této kapitole je proveden návrh řídicího systému, který obnáší řídicí software pro zvolenou řídicí jednotku, software pro řízení z PC a napěťové přizpůsobení nezbytné pro řízení daného manipulátoru. Návrh vychází z obecných požadavků na řídicí systém s důrazem zejména na bezpečnost.

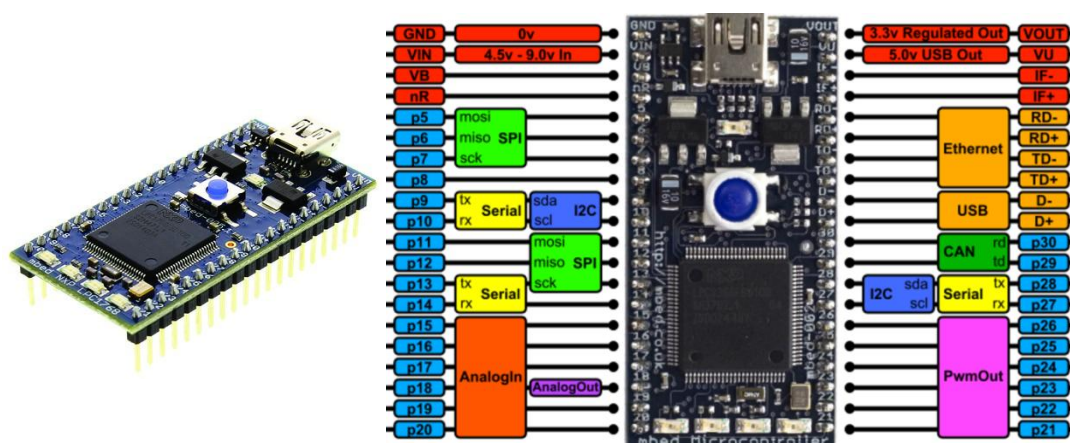
4.1 Návrh hardware

Daná řízená soustava se skládá z několika odlišných prvků. V následující části práce je provedena volba a návrh možného zapojení jednotlivých zvolených hardwarových komponent včetně návrhu desky plošného spoje.

Řízení daného manipulátoru vyžaduje v šesti případech (šest vodičů) použití výstupního napěťového signálu s úrovní 24 V pro ovládání ventilů a analogový napěťový signál v rozsahu (0 až 10) V pro řízení proporcionálního ventilu. Koncové snímače polohy, jejichž celkový počet je šest, vysílají napěťový signál 24 V a zpětná vazba o poloze lineárního pohonu je řešena prostřednictvím sběrnice CAN. Pro tyto komponenty bude proveden návrh hardware.

4.1.1 Volba řídicí jednotky

Požadavkem zadání je řízení manipulátoru prostřednictvím PC, tento požadavek je nutné zohlednit při volbě řídicí jednotky. Dalším požadavkem vyplývajícím z dané řízené soustavy je možnost připojení více komponent s různým rozhraním. Je zde nutné realizovat regulátor polohy, komunikaci s PC a je kladen požadavek na úpravu chování řídicího systému v případě potřeby.



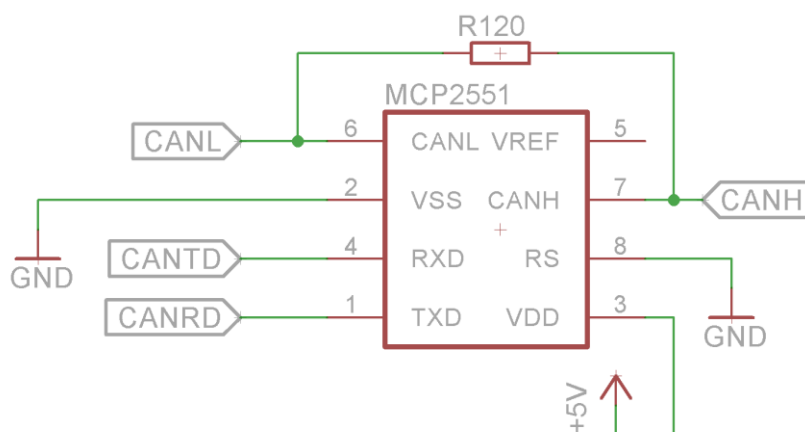
Obr. 24 MBed LPC1768 [25].

Na základě uvedených předpokladů, požadavků zadání a složení komponent řízeného manipulátoru byl zvolen jako řídicí jednotka mBed LPC1768 (Obr. 24). Jedná se o univerzální řešení, které poskytne v kombinaci s napěťovým přizpůsobením vhodný řídicí systém pro daný účel.

Komunikace mezi PC a řídicí jednotkou je řešena pomocí USB (Universal Serial Bus), která je již v základu součástí samotné řídicí jednotky a umožňuje jak nahrávání programu do jednotky, tak komunikaci po sériové sběrnici [26]. Díky použití této sběrnice bude možné s danou řídicí jednotkou komunikovat (za předpokladu znalosti řídicích zpráv) z libovolného zařízení podporujícího tuto zmíněnou sběrnici.

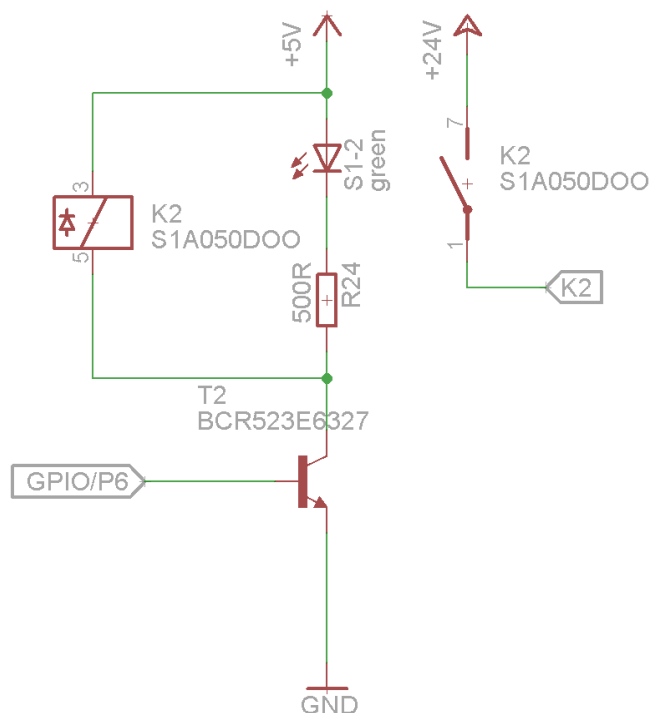
4.1.2 Návrh napětového přizpůsobení

Pro realizaci komunikace po sběrnici CAN je nutné zvolenou řídicí jednotku rozšířit o připojení tzv. „budiče“. Pro tento případ lze použít například integrovaný obvod MCP 2551-I/P. Ukázka možného zapojení je uvedena na Obr. 25. CANL a CANH značí výstupní piny určené k připojení ke sběrnici. Vstupy označené CANTD a CANRD slouží k připojení mBedu k tomuto obvodu.



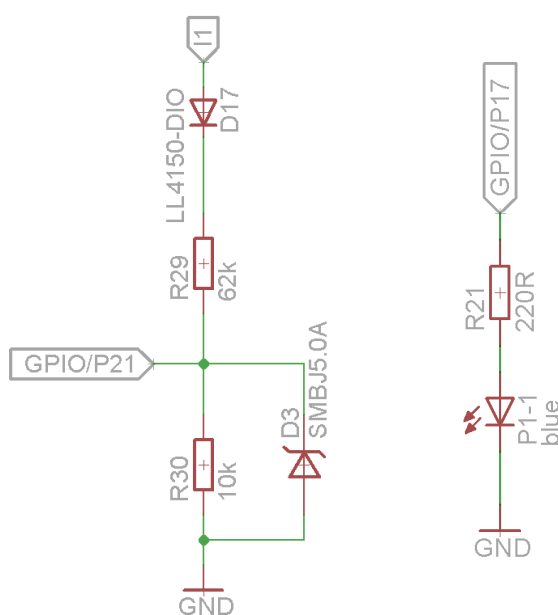
Obr. 25 Zapojení MCP 2551 [27].

Řízení ventilů vyžaduje spínání napětového signálu (Tab. 1). Pro tento případ je voleno zapojení tranzistoru (BCR523E6327) a elektromagnetického relé (S1A050D00). Ukázka zvoleného (možného) zapojení je uvedena na Obr. 26. Výhodou zvoleného relé je jeho zabudovaná ochrana (polovodičovou diodou) proti napětovým špičkám vzniklých důsledkem rozpojování indukčnosti. Stav relé jsou indikovány příslušnými LED prvky. Na obrázku Obr. 26 je uveden vstup do tranzistoru označený jako GPIO/P6. Jedná se o logický vstup 0/3,3 V připojený k mBedu. Tranzistor zde funguje ve spínacím režimu. Označení K2 v tomto schématu reprezentuje výstupní napětí 24 V, které je při sepnutí zmíněného relé vyvedeno na výstupní svorkovnici, která je dále připojena k elektromagnetickým ventilům, pomocí již je manipulátor řízen.



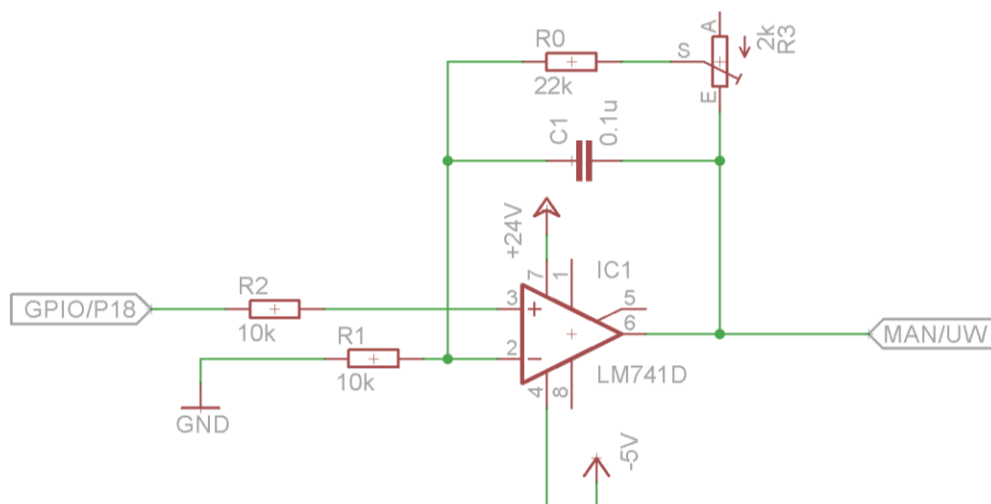
Obr. 26 Zapojení relé.

Pro snímání signálů z koncových snímačů je zvoleno řešení zapojení pomocí „odporové děličky“. Tento obvod je chráněn diodou proti zápornému napětí na vstupu (na obrázku uvedeném níže je tento vstup označen jako I1) a přímý vstup do mBedu (zde označený jako GPIO/P21) je chráněn transilem proti napěťovým špičkám. Napětí bude snímáno na „menším“ rezistoru, kde by úbytek napětí měl být 3,3 V. Indikace aktivního příslušného vstupu je reprezentována LED řízených pomocí mBedu výstupem GPIO/P17 pro tento případ. Ukázka zmíněného zapojení je uvedena na Obr. 27.



Obr. 27 Dělič napětí a signalizace.

Pro řízení proporcionálního ventilu je vyžadován analogový napěťový signál. Toto lze realizovat například pomocí zapojení tranzistoru nebo operačního zesilovače. Z důvodu linearity a úspornějšího zapojení je voleno zapojení pomocí operačního zesilovače napětí s neinvertujícím vstupem [7]. Ukázka zapojení viz. Obr. 28. Do operačního zesilovače vstupuje analogový signál z mBedu označený na níže uvedeném schématu jako GPIO/P18. Zesílený signál je pak vyveden na výstup s označením MAN/UW.



Obr. 28 Zapojení operačního zesilovače.

Výpočet hodnot je uveden v následující části práce, kde písmeno „A“ značí potřebné zesílení a označení rezistorů je v souladu s předchozím uvedeným obrázkem. Hodnota výstupu volené řídicí jednotky je uváděna v rozsahu (0 až 3,3) V.

$$A = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}} = \frac{10-0}{3,3-0} = \underline{3,03} \quad (1)$$

$$A = \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right) \quad (2)$$

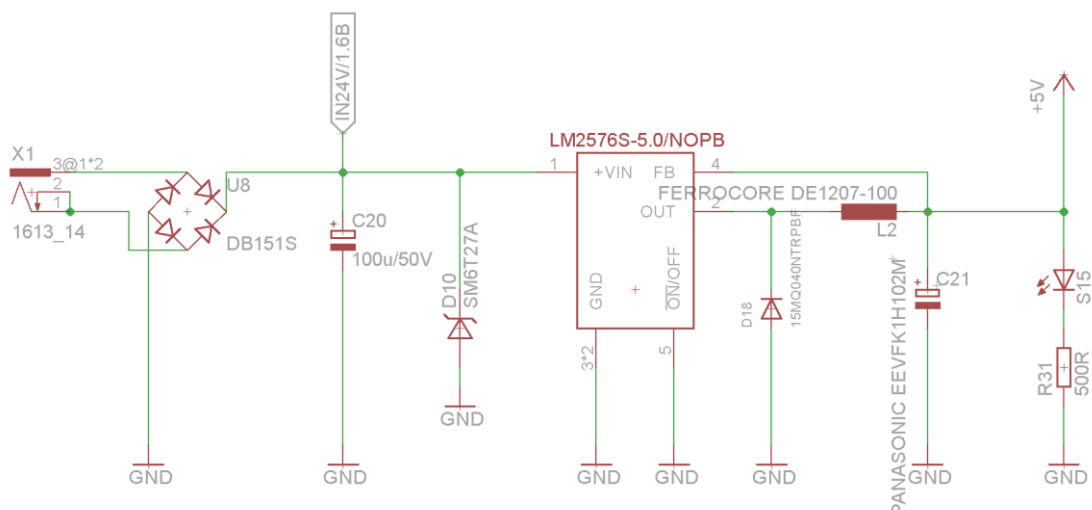
Rezistor R_1 je volen 10 k Ω a porovnáním rovnice (1) a (2) určíme zbývající hodnotu zpětnovazebního rezistoru R_0 .

$$3,03 = \left(1 + \frac{R_0}{10\,000}\right)$$

$$2,03 = \frac{R_0}{10\,000}$$

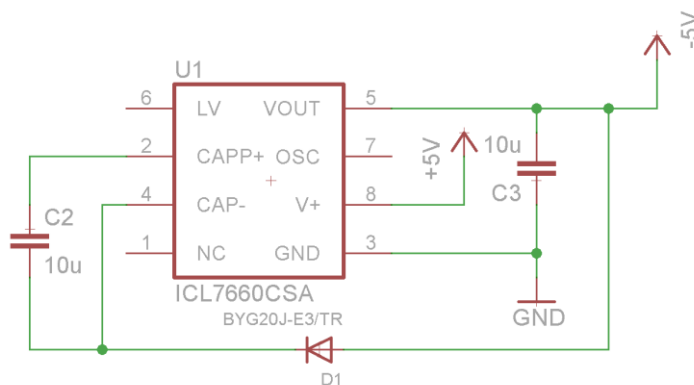
$$\underline{R_0 = 20300\,\Omega}$$

Pokud by výstupní napětí řídicí jednotky bylo o 0,2 V nižší než uvažované, hodnota rezistoru R_0 by byla 22,5 k Ω . Z toho důvodu je volena hodnota zmíněného rezistoru na hodnotu 22 k Ω a zapojení je rozšířeno o trimr, jehož hodnota bude nastavena experimentálně. Úroveň výstupního napětí i tzv. offset lze programově nastavit, proto je toto zvolené řešení možné a proveditelné.



Obr. 29 Regulátor napětí.

Zvolená řídicí jednotka vyžaduje pro své napájení (4,5 až 9) V. Pro dosažení „nulového“ výstupního napětí z operačního zesilovače (na Obr. 28 pin 6) je nutné připojení na OZ i zápornou hodnotu napájecího napětí. Zbylé prvky v systému jsou napájeny hodnotou 24 V. Z toho důvodu je voleno zapojení spínaného napěťového DC/DC měniče LM2576S (Obr. 29) (s výstupem 5 V pro mBed) a DC/DC měniče ICL7660S (invertoru pro záporné napájecí napětí operačního zesilovače) (Obr. 30). Připojení napájení desky je realizováno pomocí konektoru označeného jako X1. Upravené napětí (IN24V) je vedeno přes tlačítko panelu manipulátoru „central stop“ zpět do desky, kde je dále použito k napájení příslušných obvodů a jako napěťový signál k řízení elektromagnetických ventilů. Upravené napětí 5 V je vedeno přímo k příslušným součástkám. Jednou z výhod zvoleného zapojení, které obsahuje Graetzův můstek, je možnost přepólování vstupního napájecího napětí bez rizika poškození součásti. V případě připojení vyššího než předepsaného napětí nebo v případě napěťových špiček, je obvod chráněn transilem příslušné hodnoty.



Obr. 30 Zapojení invertoru napětí.

4.1.3 Návrh DPS

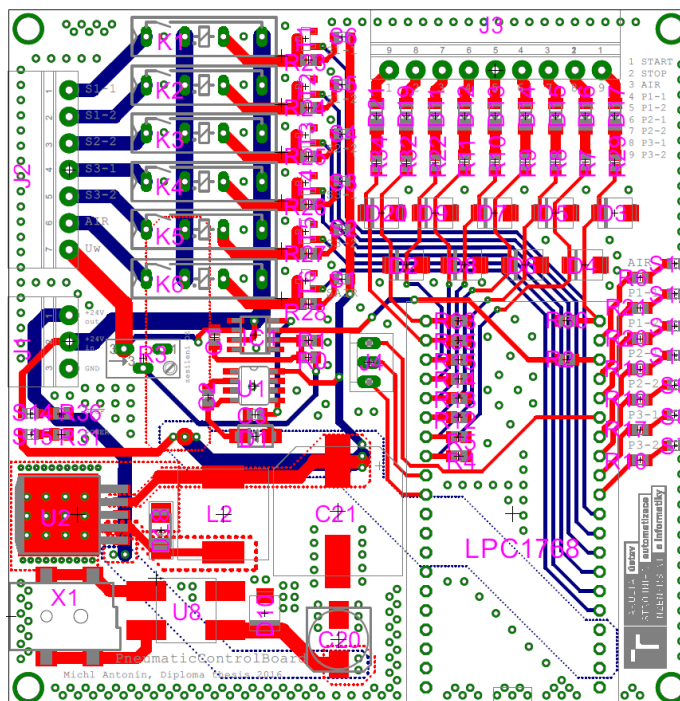
V programu Eagle CAD Soft byl vytvořen návrh desky plošného spoje. Elektronická verze všech schémat zapojení včetně návrhu DPS jsou součástí elektronické přílohy této práce (příloha 1). Navržené zapojení napěťového přizpůsobení bylo nejprve testováno pomocí vývodových součástek na nepájivém poli, poté byl proveden návrh DPS za použití převážně SMD součástek. SMD součástky jsou umístěny pouze na straně TOP.

Během testování navrženého zapojení bylo zjištěno, že lineární pohon s absolutním odměřováním nekomunikuje (po sběrnici CAN). Po kontaktu s výrobcem byl obdržen datasheet a instrukce definující požadovanou komunikaci se zařízením. Byl připojen sběrnicový analyzátor, který ověřil správnost funkce zapojených obvodů a obsah vysílaných zpráv dle získaného datasheetu. Zařízení neodpovídá na jakoukoli vyslanou zprávu. Existuje důvodné podezření, že je toto zařízení poškozeno. Důvodem tohoto podezření je stáří zařízení a skutečnost nevhodného barevného označení napájecích vodičů, díky kterému mohla předchozí obsluha manipulátoru zařízení snadno poškodit. Připojovací vodiče mají následující barevné označení:

- žlutá – CAN high,
- zelená – 0V,
- hnědá – 24V,
- bílá – CAN low.

Z tohoto důvodu nebyl obvod pro komunikaci s CAN sběrnici implementován do DPS. Pro možnost budoucího rozšíření však byly příslušné vývody z mBedu (dva piny určené pro komunikaci s CAN sběrnici) vyvedeny na konektor. Pro případ náhradního odměřování byl ze stejného důvodu vyveden stejným způsobem (1 pin) vstup pro analogový napěťový signál. Tzn. DPS je osazena tří pinovým konektorem pro případné rozšíření. Ukázka navržené desky plošného spoje v měřítku 1:1 je uvedena na Obr. 31. V případě budoucího rozšíření této desky lze zmíněný konektor přepájet na stranu BOTTOM a umístit tak pod navrženou desku plošného spoje desku rozšiřující.

Osazovací výkres a tabulka BOM (Bill Of Materials) jsou součástí příloh této práce. V případě osazovacího výkresu, který je rovněž součástí příloh, je doporučeno použít elektronickou verzi z důvodu možného přiblížení pro lepší orientaci a čitelnost.



Obr. 31 Ukázka navržené DPS v měřítku 1:1.

4.2 Návrh software

Zvolené řešení vyžaduje užití dvou různých softwarů. Jedním je software pro zvolenou řídicí jednotku (mBed) a druhým je software pro řízení manipulátoru z PC. Software pro mBed je naprogramován pomocí webového prohlížeče v jazyku C++, který je posléze přeložen a nahrán do řídicí jednotky, která jej po svém restartu spustí. Software pro vizualizaci a řízení z PC byl vytvořen v programu Visual Studio 2013 v jazyku C# jako „okenní“ aplikace. Následující podkapitoly popisují návrh a chování vytvořených programů.

4.2.1 Návrh řídicího software pro mBed

Software pro řídicí jednotku musí zajistit komunikaci s PC, zajistit bezpečnost provozu a realizovat funkce řídicí jednotky a regulátoru. Program je vytvořen za pomoci objektového programování a obsahuje celkem čtyři třídy. Samotný program pak běží ve třech vláknech. Jednotlivé třídy budou popsány v následující části práce. Návrh tohoto software vychází z myšlenky, aby jej bylo možné řídit z jakéhokoli zařízení, které umožňuje komunikaci prostřednictvím USB. Tabulka příkazů a chybových návratových kódů je uvedena v příloze 2 a 3. Tyto kódy (řídicí zprávy) jsou pro komunikaci nezbytné. Bez jejich znalosti není možné jednotku řídit.

Hlavní vlákno (Main) se stará o komunikaci s řídicím softwarem. Jeho úkol je na základě obdržených instrukcí stanovit tzv. scénu v lokálních proměnných. Scénou je v tomto kontextu myšlen souhrn dat obsahujících aktuální požadavky uživatele na stav systému (všech jeho parametrů). Důvodem je umožnění zadání několika požadavků

naráz, není však nutné zadat všechny. Parametry, které nebyly zadány jako požadované, budou voleny výchozí (případ prvního volání funkce) případně „neměnné“ proti předchozímu stavu. Po obdržení příslušného příkazu na provedení scény je scéna předána objektu „Regulator“, který je spuštěn ve vlastním vlákně. Parametry jsou požadované stavy jednotlivých pohybů, stav bezpečnostního ventilu, požadavek na blokaci a požadavek na polohu jezdce. Požadovaná hodnota polohy je předávána pomocí 16-ti bitové zprávy a ukázka jejího zpracování je uvedena v Tab. 3.

Tab. 3 Ukázka zpracování požadavku psd.

```
pc. gets ( buffer, 17 ) ; // Načtení příchozí zprávy.
for ( int i = 0 ; i < 16 ; i ++ ) // Procházíme znak po znaku.
{
    q = q / 2 ; // Stanovení kvocientu.
    if ( buffer [ i ] == '1' ) { s = s + q ; } // Výpočet „s“.
    else if ( buffer [ i ] != '0' ) {
        error ( 9905 ) ; // Chybný znak ve zprávě.
        s = - 1 ; // Hodnota užitá v případě detekce chyby.
        break ;
    }
}
reqpsd = s ; // Do požadované hodnoty je uložena vypočtená.
```

Vybrané příklady řídicích zpráv pro dosažení požadovaných stavů udává následující tabulka (Tab. 4).

Tab. 4 Ukázky vybraných řídicích zpráv.

požadovaný stav:	řídicí zpráva:
P1-1, P2-1, P3-2	q1w1e2do
PSD: 76, P2-2	pp0000000001001100w2do
vypnout vzduch	a1do
zablokovat	i0do
odblokovat	i1do
heartbeat	tt
dotaz na všechny parametry	nn

Regulátor byl zvolen PSD v přírůstkovém tvaru viz rovnice (3) [1]. Parametry regulátoru jsou předávány pomocí 96-ti bitové zprávy, kde každých po sobě jdoucích 24 bitů reprezentují jeden z parametrů PSD regulátoru v pořadí r0, T, Ti, Td. Po přijetí zprávy jsou tyto parametry kontrolovány jak z hlediska použitých symbolů ve zprávě, tak následně dle podmínek pro realizaci zvoleného regulátoru vyplývajících z rovnic (4) [1]. V případě, že jsou validní, budou použity a regulátor je automaticky zaktualizuje v další periodě. V opačném případě se nastavení regulátoru nezmění a bude odesláno chybové hlášení. Vzorkovací perioda je realizována pomocí hardwarového přerušení.

$$u(k) - u(k - 1) = q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k - 1) + q_2 \cdot e(k - 2) \quad (3)$$

$$q_0 = 1 + \frac{Td}{T} + \frac{T}{Ti}$$

$$q_1 = -r_0 \left(1 + 2 \frac{Td}{T} \right)$$

$$q_2 = r_0 \frac{Td}{T}$$

$$q_0 + q_1 + q_2 > 0 \quad (4)$$

$$q_0 + q_1 < 0$$

$$q_0 - q_2 > 0$$

$$q_0 > 0$$

Předání aktuální požadované scény je prováděno prostřednictvím objektu „Datasharer“ metodou „Datashare“, která je ošetřena „Mutexem“, a zajišťuje tak, že nedojde v jenom časovém okamžiku k zápisu a čtení příslušného místa v paměti. Obdobným způsobem je řešena většina předáváníí dat mezi vlákny.

Tab. 5 Ukázka kódu Getstate.

```
int Regulator :: Getstate ( char c ) { // Dotaz na stav dle zvoleného parametru.
    switch ( c ) { // Parametr dotazu.
        case '1' :
            if ( ( ip11. read ( ) ) && ( ! ip12. read ( ) ) ) { return 1 ; }
            else if ( ( ip12. read ( ) ) && ( ! ip11. read ( ) ) ) { return 2 ; }
            else { return - 9811 ; } ; // Chyba senzorů pohybu P1.
        case '2' :
            if ( ( ip21. read ( ) ) && ( ! ip22. read ( ) ) ) { return 1 ; }
            else if ( ( ip22. read ( ) ) && ( ! ip21. read ( ) ) ) { return 2 ; }
            else { return - 9812 ; } ; // Chyba senzorů pohybu P2.
        case '3' :
            if ( ( ip31. read ( ) ) && ( ! ip32. read ( ) ) ) { return 1 ; }
            else if ( ( ip32. read ( ) ) && ( ! ip31. read ( ) ) ) { return 2 ; }
            else { return - 9813 ; } ; // Chyba senzorů pohybu P3.
        case 'a' :
            if ( ( ! ipa. read ( ) ) && ( opa. read ( ) ) ) { return - 9899 ; }
            else if ( ! ipa. read ( ) ) { return - 9898 ; } // Není vzduch.
            else { return 1 ; }

        case 'p' :
            return psd ( 'r' , - 1 ) ; // Vrací hodnotu naměřené polohy.
    }

    return - 9803 ; // Nesprávné volání Getstate.
}
```

Objekt „Regulator“ obsahuje metody, které porovnávají aktuální a požadovaný stav systému (aktuální a požadovanou scénu) a provádí příslušné operace pro dosažení předepsaných cílů. Ukázka kódu pro získání aktuálního stavu je uvedena v Tab. 5. Řídící jednotka načte stavy příslušných vstupů (bezparametrickou metodou „read“) a testuje, zda-li nejsou chybné tzn. oba signály z koncových snímačů pro jeden pohyb neposílají logickou 1 současně, případně žádný z nich neposílá současně logickou 0.

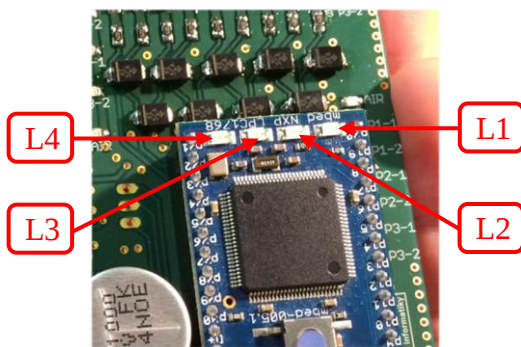
Doba přechodových dějů, a tedy časová tolerance na případné chybové stavy, je ošetřena řídicím softwarem pro PC. Ukázka kódu pro zásah je uvedena na Tab. 6. Jelikož se jedná o nepřímo ovládané ventily, jsou cívky napájeny jen po dobu nezbytně nutnou, resp. dokud nedojde k požadovanému stavu. Po dosažení tohoto stavu je napájení příslušné cívky odpojeno. Řídicí jednotka nepřipustí stav, kdy by byly současně napájeny dvě cívky působící proti sobě na jeden ventil.

Tab. 6 Ukázka kódu pro zásah.

```
if ( ds -> Datashare ( 'r' , '1' , - 1 ) == 1 ) { // Je požadavek na P1-1?
    if ( ( ip11. read ( ) ) && ( ! ip12. read ( ) ) ) { // Je stav P1-1 aktuální?
        op11 = 0 ; // Žádný zásah, vypnout napájení cívky pro řízení pohybu 1.
        op12 = 0 ; // Žádný zásah, vypnout napájení cívky pro řízení pohybu 1.
    }
    else { // V jakémkoli jiném nedefinovaném stavu.
        op11 = 1 ; // Zapnout napájení cívky pro dosažení stavu P1-1.
        op12 = 0 ; // Vypnout napájení cívky pro dosažení stavu P1-2.
        pass = false ;
    }
}

if ( ds -> datashare ( 'r' , '1' , - 1 ) == 2 ) { // Je požadavek na P1-2?
    if ( ( ip12. read ( ) ) && ( ! ip11. read ( ) ) ) {
        op11 = 0 ; // Žádný zásah, vypnout napájení cívky pro řízení pohybu 1.
        op12 = 0 ; // Žádný zásah, vypnout napájení cívky pro řízení pohybu 1.
    }
    else {
        op11 = 0 ; // Vypnout napájení cívky pro dosažení stavu P1-1.
        op12 = 1 ; // Zapnout napájení cívky pro dosažení stavu P1-2.
        pass = false ;
    }
}
}
```

Třída „Checkcon“ (Check Connection), která je také spuštěna ve vlastním vlákně, má za úkol hlídat neustálé připojení s řídicí jednotkou a v případě ztráty připojení zablokovat manipulátor a zajistit tak bezpečnost provozu. Ověření připojení je realizováno metodou „heartbeat“, kde řídicí jednotka inkrementuje lokální proměnnou a na daný příchozí příkaz ji nuluje. Pokud dojde k překročení zvolené hodnoty inkrementované proměnné, dojde k zablokování jednotky. Tuto funkci lze příslušným příkazem (řídicí zprávou ve tvaru „t0“) v případě potřeby vyřadit. Opětovné spuštění nastane po restartu jednotky, nebo příslušným příkazem (řídicí zprávou „t1“).

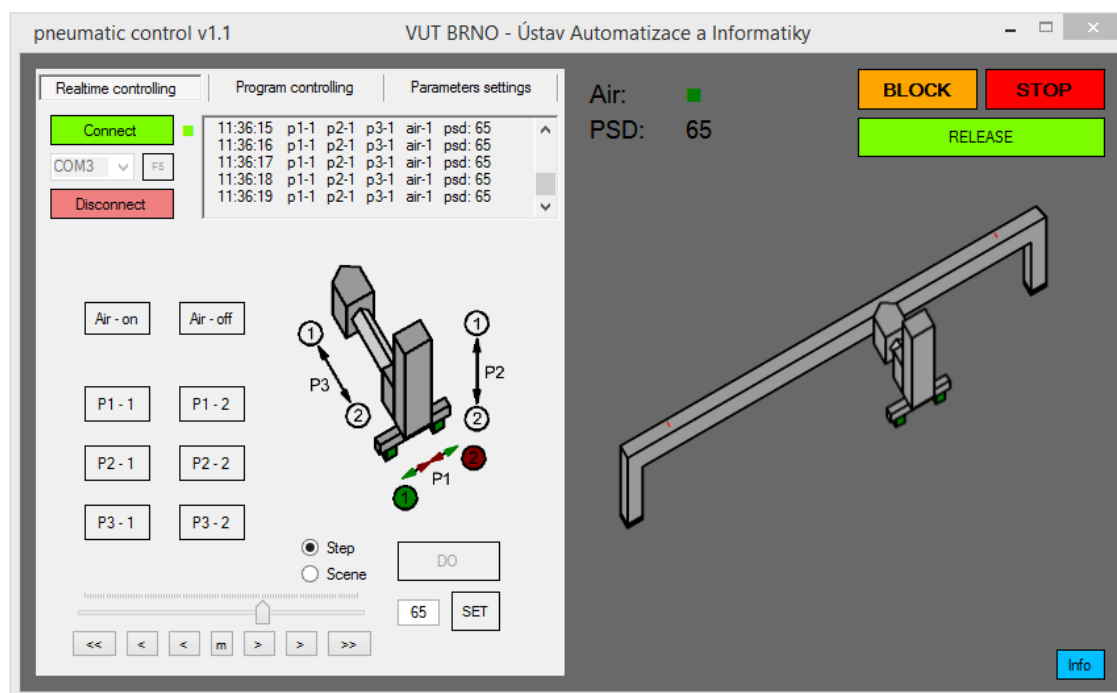


Obr. 32 Ukázka LED označení mBedu.

MBed obsahuje čtyři LED-diody, označme je v pořadí zprava doleva (Obr. 32) jako L1, L2, L3 a L4. L4 je použita k indikaci blokace. Pokud je jednotka zablokována (L4 svítí), je zabráněno změně stavu všech pohybů i polohy jezdce (proporcionální ventil je nastaven na střední polohu). Odblokování jednotky je možné buď jejím restartem nebo příslušným příkazem přes sériovou komunikaci. Po úspěšném odblokování L4 zhasne. L3 slouží k indikaci běhu programu. Pokud L3 bliká, je regulační vlákno aktivní (pokud neblinká, jedná se o nedeterminovaný chybový stav – neměl by nastat). Pokud je detekován některý ze známých chybových stavů manipulátoru (tj. například signál z obou čidel pro jeden pohyb současně nebo žádný signál pro daný pohyb) dojde k rozsvícení L2, která indikuje chybový stav. Podle programu dojde po uplynutí určité doby k zablokování jednotky (časová prodleva je volena z důvodu možných přechodových stavů), ovšem chybové zprávy jsou odesílány okamžitě, ihned při detekci chybového stavu. V programu lze podle hodnoty proměnné s názvem „i“ (která je dotazovatelná po sériové komunikaci příslušným příkazem) určit příčinu zablokování (uživatel, chybovým stavem, heartbeat, první spuštění, konec demo ad.). Významy těchto jednotlivých chybových kódů jsou uvedeny v softwaru pro řízení z PC. Pokud aktuální stav manipulátoru (ve všech parametrech) odpovídá stavu požadovanému, L1 nesvítí. V opačném případě je tento rozpor indikován. Pokud je manipulátor zablokován a L1 nesvítí, znamená to skutečnost, že po odblokování jednotky nedojde ke změně stavu manipulátoru, a je tedy sníženo riziko zranění obsluhy. Pokud je ovšem manipulátor zablokován (L4 svítí) a současně svítí L1, znamená to skutečnost, že po odblokování dojde k nějaké změně stavu (pohybu manipulátoru), a existuje tedy vyšší pravděpodobnost, že může dojít ke zranění obsluhy nepozorností (rychlost pohybu komponent je v řádech metrů za sekundu). V tomto případě je nutné dbát zvýšené pozornosti při procesu odblokování!

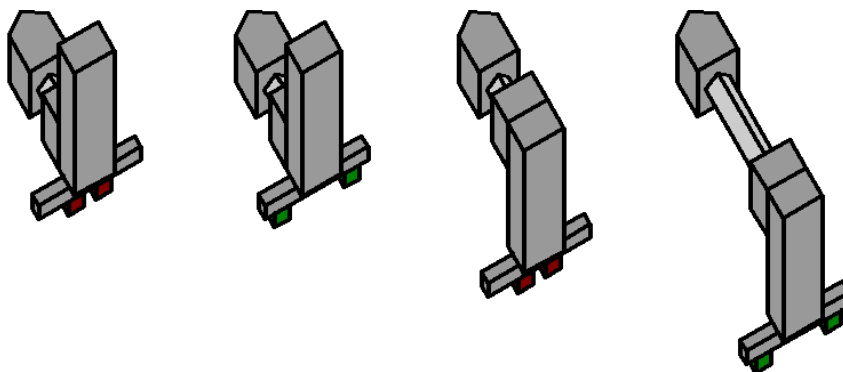
Řídicí software je rozšířen o možnost „demo“ prezentace. Demo je zde programová smyčka simulující řídicí zprávy pro zvolenou jednotku, aby bylo možné provést ukázkou řízení manipulátoru bez připojení řídicího software. Demo je spuštěno po kliknutí na zelené tlačítko start na panelu manipulátoru. Dané příchozí signály z tlačítek panelu vyvolají přerušení a požadovanou činnost v programu. Průběh demo lze modifikovat pouze úpravou kódu v řídicí jednotce (v třídě „Demo“). Demo je nekonečná smyčka simulující úlohu přemísťování břemena z koncových poloh. K jejímu ukončení je potřeba přerušit signál od stop tlačítka (jeho stiskem) nebo odpojením napájení řídicí jednotky (tzn. restart). K ukončení demo taktéž dojde, pokud řídicí jednotka obdrží jinou než „nn“ (dotaz na stav manipulátoru) nebo „tt“ (heartbeat) zprávu prostřednictvím sériové komunikace, nebo pokud nastane nějaký chybový stav. V případě spuštěného demo není prováděna kontrola připojení řídicího software (není vyžadován heartbeat). Po ukončení demo bude jednotka automaticky zablokována a bude opět spuštěna kontrola připojení řídicího software.

4.2.2 Návrh řídicího software pro PC



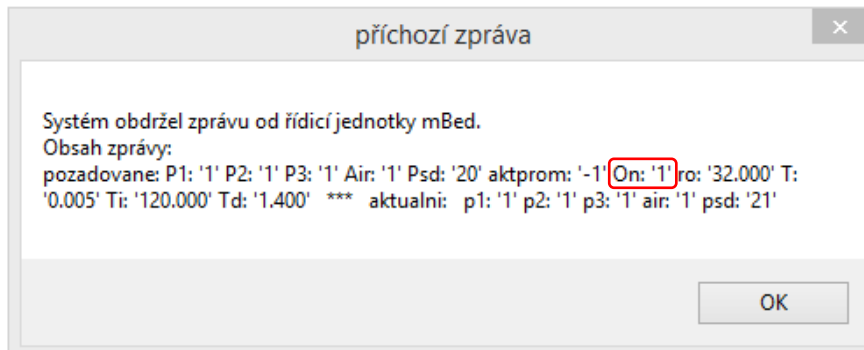
Obr. 33 Ukázka záložky Realtime controlling.

Řídicí software pro PC je navržen jako „okenní“ aplikace a obsahuje tři základní záložky (karty). Pro umožnění všech funkcí řídicího programu je ovšem nejprve nutné připojit řídicí jednotku. První záložkou je tzv. „Realtime controlling“, která slouží pro přímé řízení uživatelem (Obr. 33). Tímto je myšleno, že hned po kliknutí zvoleného požadavku je ihned odeslána řídicí zpráva. Uživatel má na výběr zadání všech parametrů jednotlivě nebo lze v dolní části programu přepnout „Radiobutton“ z položky „Step“ na položku „Scene“. Poté je možné zadávat několik příkazů současně. V případě „Scene“ budou požadavky po kliknutí zvýrazněny modře a bude umožněno použití tlačítka „DO“, které vytvoří a odešle příslušnou řídicí zprávu (požadavky budou vykonány současně). Vedle tlačítek pro připojení je informační pole, které každou sekundu vypisuje aktuální stav manipulátoru a časový údaj. Je-li detekována chyba čidel, ve schématu je daný pohyb označen blikajícím výstražným trojúhelníkem. V levé dolní části se nacházejí tlačítka (umístěna pod „Trackbarem“), která slouží k nastavení konkrétních hodnot požadavků na polohu manipulátoru. Jelikož však dočasně není realizováno měření polohy, řídicí jednotka je nastavena tak, aby vycházela z předpokladu, že se nachází na pozici „50“ (uprostřed možného rozsahu), a regulační odchylka bude tedy přímo úměrná akčnímu zásahu, tzn. že v tomto případě tyto tlačítka realizují spíše nastavení polohy proporcionálního ventilu („rychlost“ pohybu manipulátoru do stran).



Obr. 34 Ukázka ilustrací vybraných jezdců.

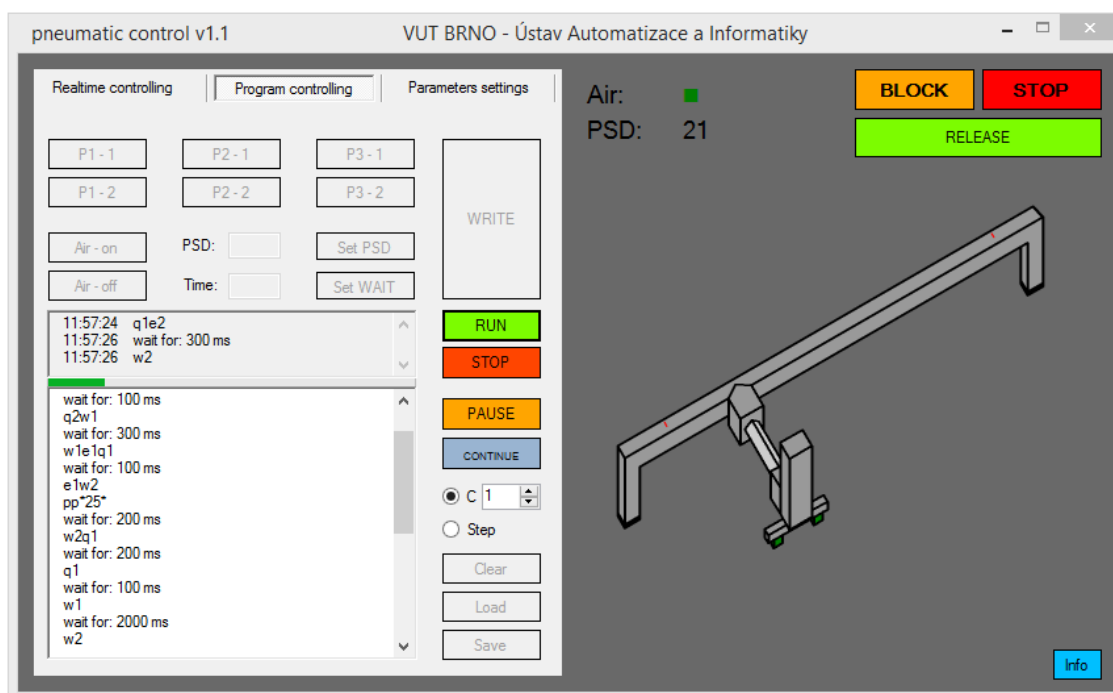
V pravé části okna je realizována vizualizace. Vizualizace zobrazuje aktuální polohu jezdce a ilustruje stavy všech pohybů. Principem vizualizace je změna ilustrace stavu jezdce (Obr. 34) a jeho relativní polohy vůči statickému rámu. Jelikož pro danou aplikaci existuje 8 různých stavů jezdce, bylo vytvořeno 8 reprezentujících modelů pro příslušné stavy. V programu jsou pak označeny binárním kódem podle příslušných stavů jednotlivých pohybů, což umožňuje přehledné a logické užívání vizualizačních procedur. Ukázka na obrázku Obr. 34 je volena pro ilustraci stavů (zleva): P1-2 P2-1 P3-1, P1-1 P2-1 P3-1, P1-2 P2-2 P3-1, P1-1 P2-2 P3-2. Vizualizace je prováděna po celou dobu činnosti řídicího programu.



Obr. 35 Ukázka informační zprávy.

V pravém horním rohu (pro všechny záložky) jsou umístěna tlačítka pro blokaci řídicí jednotky, úplného zastavení a odblokování jednotky. Tlačítko „STOP“ vyvolá blokaci jednotky a uzavře přívod vzduchu, tlačítko „BLOCK“ pouze znemožní změnu stavů manipulátoru. Tlačítkem „RELEASE“ je odeslána řídicí zpráva pro odblokování jednotky. Informace o stisknutí těchto tlačítek je zobrazena do informačního pole včetně časového údaje. Modré tlačítko „Info“ umístěné vpravo dole slouží uživateli pro získání všech informací od řídicí jednotky. Ukázka takovéto informační zprávy je na Obr. 35. Pro vizualizaci se však tato informační zpráva vzhledem k její délce nepoužívá, pro tento účel je použita řídicí zpráva „xx“. Červeně vyznačený parametr „On“ (zminěná proměnná „i“) na výše uvedeném obrázku označuje proměnou definující požadavek na

blokaci manipulátoru. Podle příslušné hodnoty lze určit příčinu případné blokace. Tabulka těchto chybových kódů je součástí příloh této práce (Příloha 3).

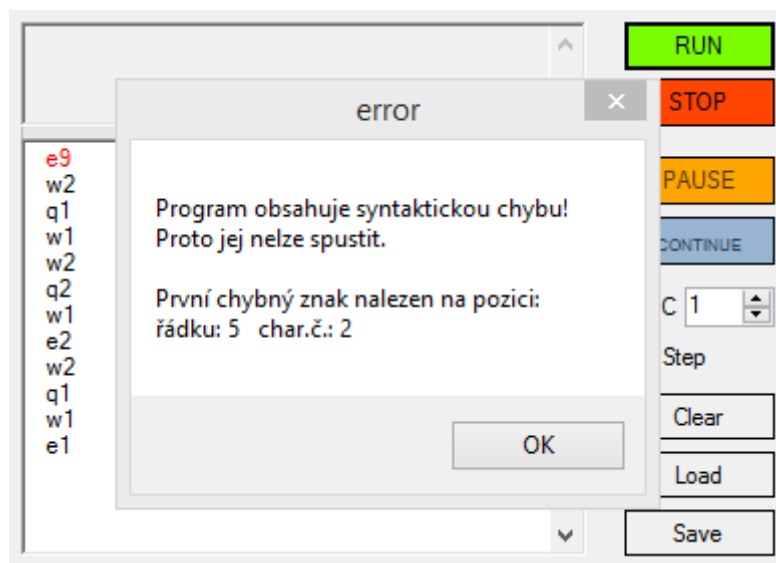


Obr. 36 Ukázka záložky Program controlling.

Druhou záložkou (Obr. 36) navrženého řídicího software je Program controlling. Jedná se o záložku určenou k řízení manipulátoru uživatelským programem, který je tvořen sekvencí modifikovaných řídicích zpráv. Uživatel je umožněno zadávat jednotlivé modifikované řídicí zprávy ručně, případně lze užít levého horního panelu s příslušnými prvky pro nastavení požadované scény a stiskem tlačítka „WRITE“ zapsat příslušnou řídicí zprávu do programu (v případě, že ji uživatel nezná nebo je pro něj tento způsob zápisu programu více vyhovující). Program vykonává zadanou sekvenci zpráv po řádcích. Zadávání požadavku polohy je zde možné ve zkrácené podobě „pp*xx*“ kde xx je decimální hodnota požadované PSD a program ji sám přeloží na potřebný binární řetězec (pro ulehčení psaní kódu) např. pp*8*, nebo v úplné podobě tzn. pro uvedený případ „pp0000000000001000“. Je zde možné i zadání časové prodlevy mezi jednotlivými řídicími zprávami pomocí navolené hodnoty v poli „Time“ tlačítkem „Set WAIT“.

Sekvence těchto řídicích zpráv je zadávána do levé dolní části. V případě spuštění programu je textová sekvence posouvána tak, aby první řádek odpovídal vždy nadcházející řídicí zprávě. Informační pole zde vypisuje již zpracované řídicí zprávy (zdola nahoru) a na jeho spodním řádku je zobrazena právě vykonávající se řídicí zpráva (případně zpráva, pro níž je čekáno na dosažení jejího požadovaného stavu). Navržený řídicí software kontroluje před spuštěním řídicího procesu zadanou sekvenci zpráv. Je zde realizována syntaktická kontrola, která v případě detekce chyby tento

chybný prvek označí červeně, posune text tak, aby byl první řádek s nalezenou chybou zobrazen jako první, a program nebude spuštěn. Ukázka detekce chybného příkazu „e9“ viz Obr. 37 (možné správné varianty jsou pouze „e1“ nebo „e2“).



Obr. 37 Ukázka nalezení syntaktické chyby programu.

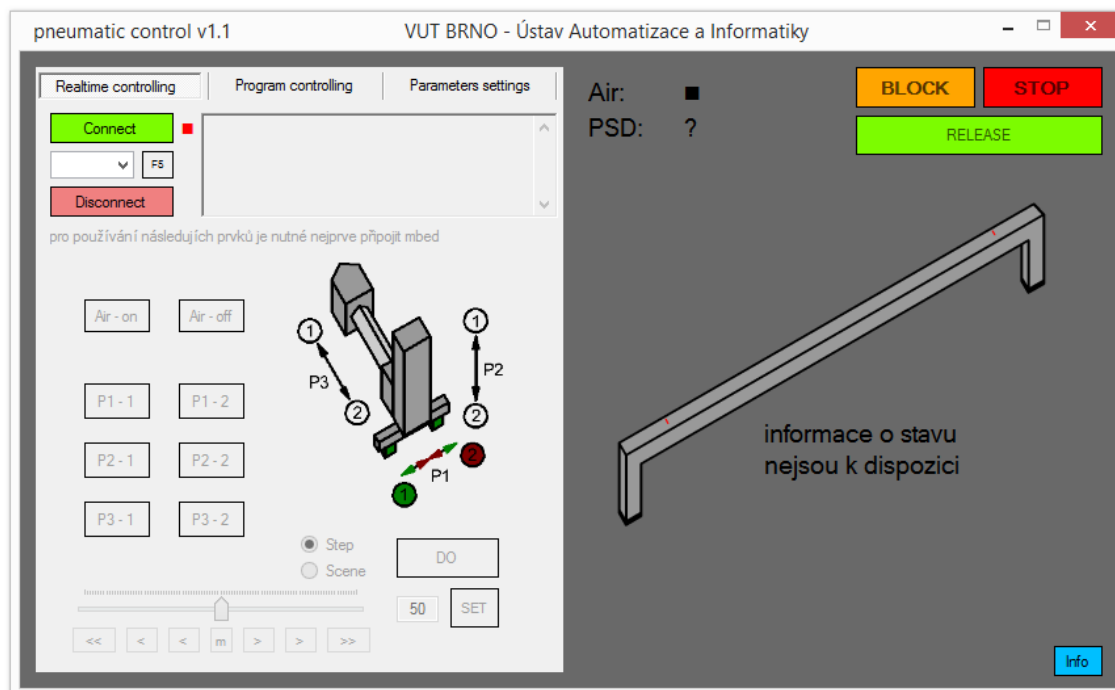
V případě syntakticky korektního programu je možné daný řídicí proces spustit jednou nebo opakovaně ve smyčce. V případě zaškrtnutí Radiobutton „C“ („Cycle“), bude řídicí proces opakován dle příslušné zadané hodnoty. Proces lze pozastavit a opět znovu spustit tlačítky „PAUSE“ a „CONTINUE“. V případě přepnutí do režimu „Step“, bude umožněno daný program „krokovat“. Další krok je umožněn, pokud byly úspěšně splněny požadavky předchozí řídicí zprávy (aktuální stav odpovídá požadovanému, tzn. L1 nesvítí) a tato skutečnost je indikována blikajícím zeleným čtvercem v oblasti tlačítka CONTINUE. V tomto případě lze stiskem tlačítka CONTINUE odeslat následující řídicí zprávu. V opačném případě bude obsluha upozorněna a řídicí systém bude dále čekat na dosažení daného předepsaného cíle.

Sekvenci řídicích zpráv (uživatelský program) lze uložit, případně načíst či exportovat ve formátu textového souboru (.txt). Tento soubor je možné editovat libovolně (úprava programu), nutné je pouze dodržení zvolené syntaxe. Textové soubory s demo programy jsou součástí příloh této práce.

Poslední záložka slouží k nastavení parametrů zvoleného proporcionálně sumačně diferenčního regulátoru. Je zde možnost zadat vzorkovací periodu, integrační časovou konstantu, derivační časovou konstantu a hodnotu zesílení. Platí zde stejné podmínky, jako byly uvedeny v případě regulátoru v kapitole 4.2.1. Parametry regulátoru byly experimentálně optimalizovány a zvoleny v kapitole 5.3.

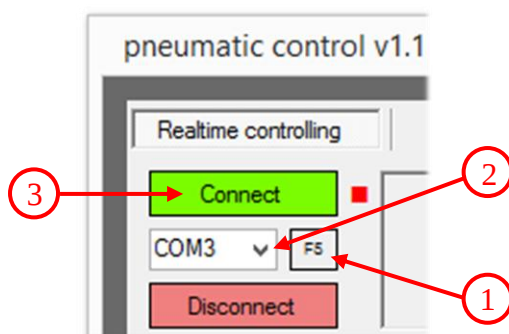
4.2.3 Zjednodušený návod na použití

Připojte mBed k PC a spusťte řídicí software „pneumatic control v1.1.exe“. Okno programu bude odpovídat dle Obr. 38.



Obr. 38 Ukázka prvního spuštění řídicího software.

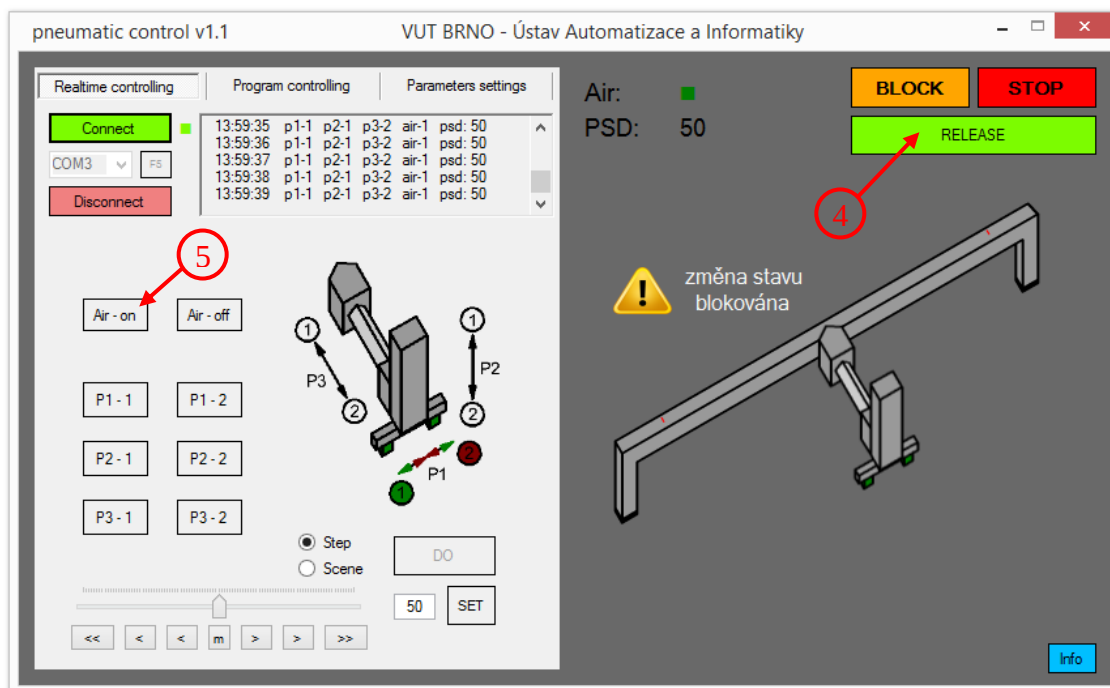
V dalším kroku klikněte na tlačítko F5, umístěné na první kartě Realtime controlling v levém horním rohu, dále vyberte příslušný port a klikněte na něj. Stiskněte zelené tlačítko Connect a v případě úspěšného navázání komunikace bude vedle tohoto tlačítka zobrazen blikající zelený čtverec. V opačném případě bude tento čtverec červený. V obrázku Obr. 39 je vyznačen pomocí číselných odkazů chronologický postup jednotlivých kliknutí.



Obr. 39 Připojení mBedu.

Manipulátor je po prvním spuštění automaticky zablokovaný, proto je nutné provést jeho odblokování pomocí zeleného tlačítka RELEASE umístěného v pravém horním rohu. Bezpečnostní ventil je při výchozím nastavení uzavřen, proto je dále nutné

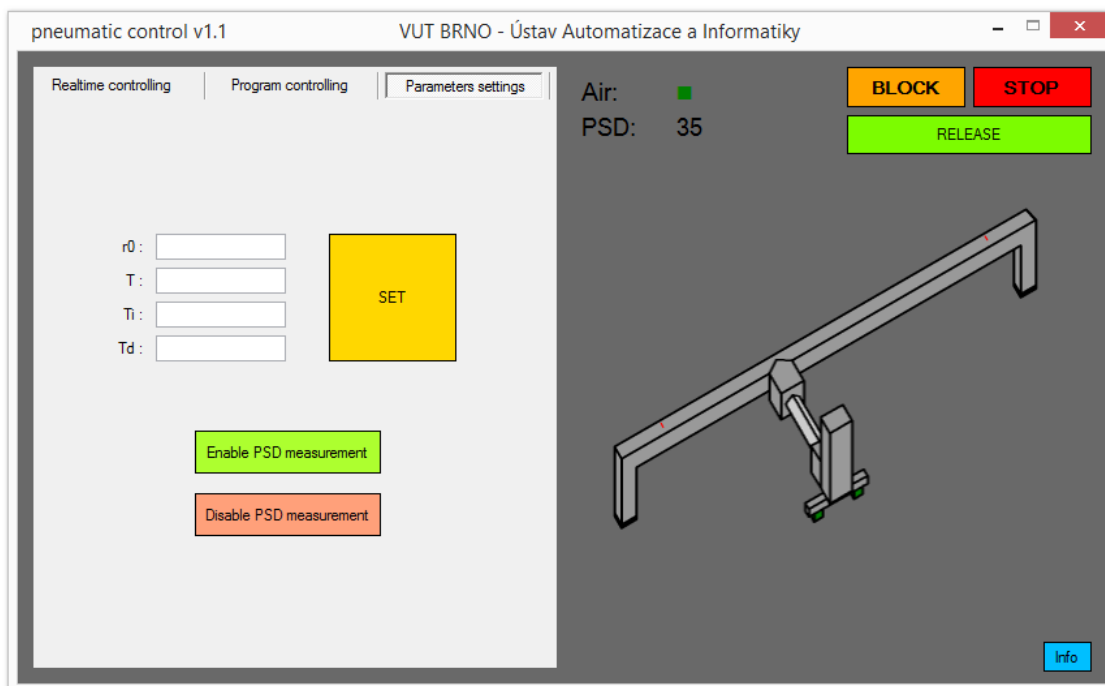
provést jeho otevření tlačítkem Air – on a rovněž je nutné zkontrolovat manuální ventil, zda-li je otevřen přívod vzduchu do soustavy. Na Obr. 40 je popsán pomocí číselných odkazů chronologický postup jednotlivých kliknutí, číslování navazuje na předchozí kroky uvedené na Obr. 39.



Obr. 40 Ukázka postupu pro spuštění manipulátoru.

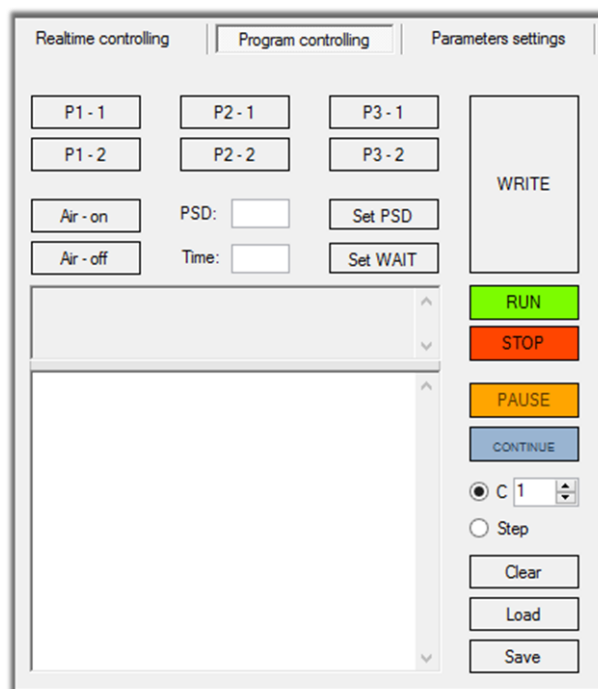
Nyní je manipulátor připraven k řízení. V kartě Realtime controlling lze provádět příkazy přímo nebo prostřednictvím scény jak již bylo popsáno v kapitole 4.2.2. V levém dolním rohu této karty lze nastavovat požadovanou hodnotu polohy (pomocí tlačítek, jezdce či přímo zadáním hodnoty do příslušného pole). Příkaz je nutno potvrdit tlačítkem SET (s výjimkou užití tlačítek, kde je příkaz odeslán ihned).

Na Obr. 42 je uvedena ukázka karty Program controlling. V levé dolní části se nachází textové pole sloužící k zadávání kódu. Zde je nutné uvádět příkazy jednotlivých scén na jednotlivé řádky. Tvary řídicích zpráv jsou uvedeny v příloze 2 s rozdílem, že zde není nutno uvádět v těchto příkazech „do“, program jej automaticky doplní pro každý řádek. V případě jejich neznalosti slouží horní část této karty, kde lze požadovanou scénu zadat pomocí tlačítek a do programu zapsat tlačítkem WRITE (tímto způsobem lze také zjistit správné příslušné tvary daných příkazů pro další programování). Prázdný řádek ukončí program.



Obr. 41 Ukázka karty Parameters settings.

Na obrázku Obr. 41 je uvedena karta Parameters settings, kde pomocí tlačítek Enable PSD measurement lze spustit měření polohy pomocí analogového vstupu vyvedeného na rozšiřovací konektor. Tlačítkem Disable PSD measurement bude toto měření vypnuto, jednotka bude uvádět defaultní hodnotu polohy „50“ a v programech budou vyřazeny kontroly na její dosažení.



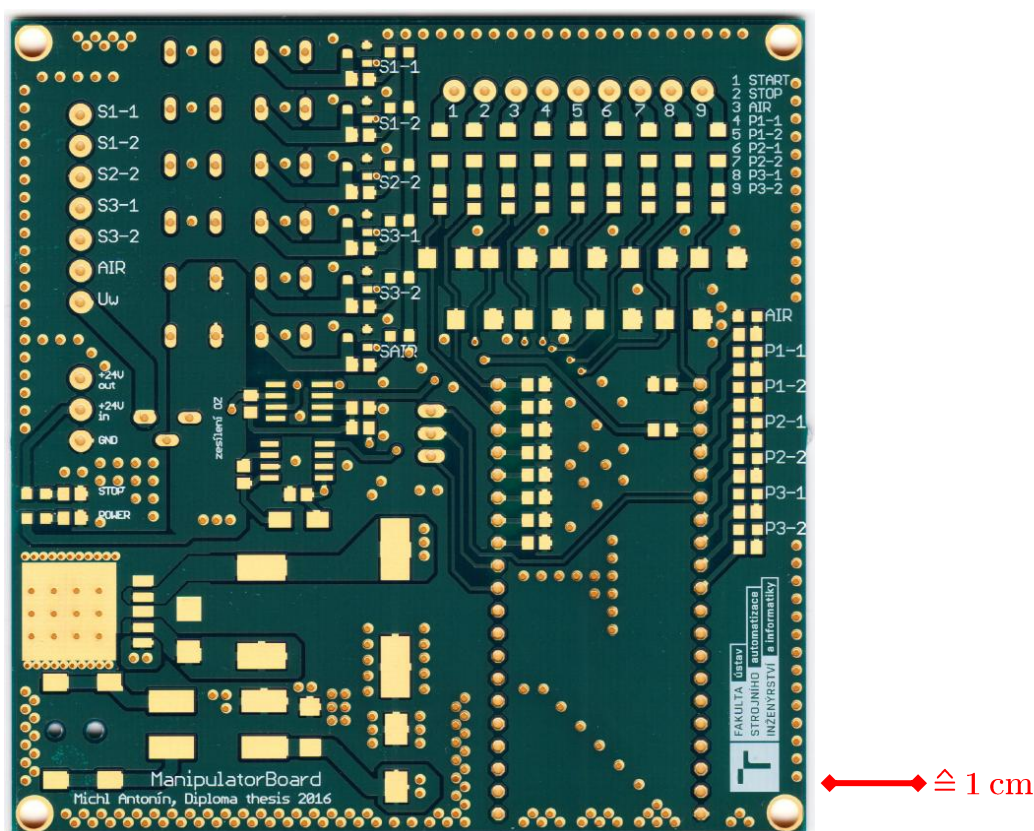
Obr. 42 Ukázka karty Program controlling.

5 PRAKTICKÁ REALIZACE

Tato část práce se zabývá praktickou realizací. Po provedení experimentů na nepájivém poli, navržení schémat zapojení včetně provedení volby konkrétních součástek a návrhu desky plošného spoje byla deska zadána do výroby.

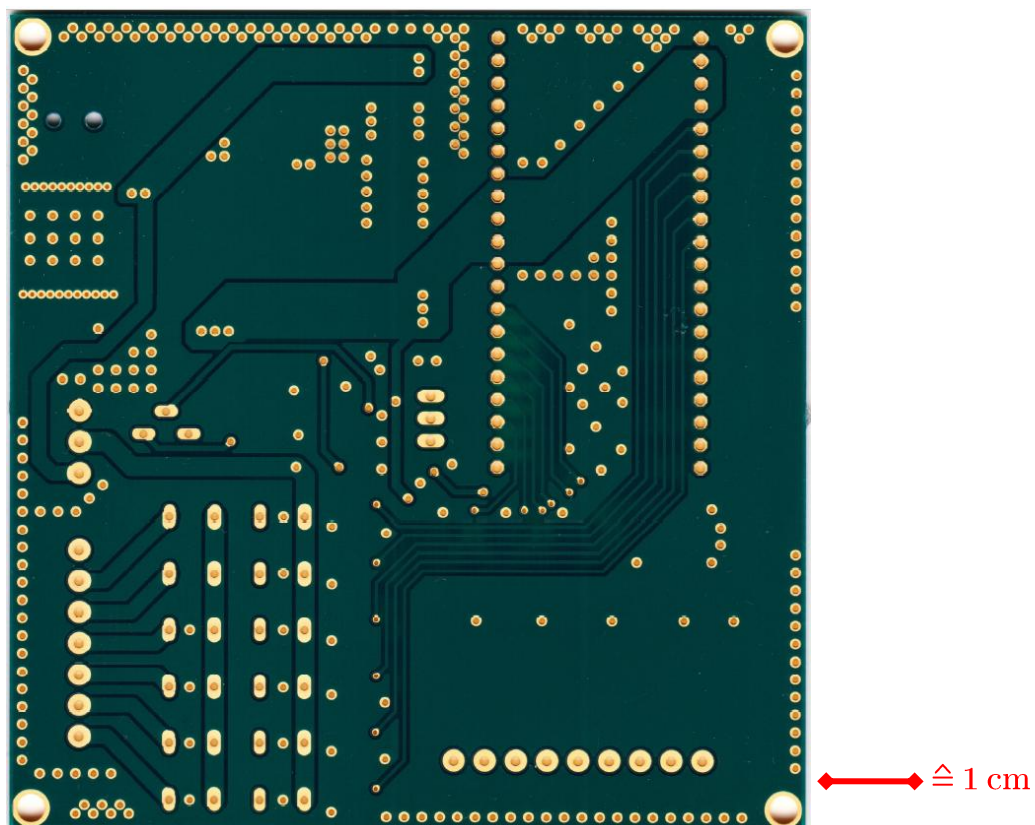
5.1 Výroba DPS

Na obrázku Obr. 43 je uvedena ukázka neosazené desky plošného spoje strany TOP, na Obr. 44 je uvedena ukázka strany BOTTOM této desky. Součástí příloh této práce je veškerá dokumentace nezbytná pro výrobu této desky. V příloze 6 a 7 je zobrazena strana TOP a BOTTOM navržené desky plošného spoje v měřítku 1:1.

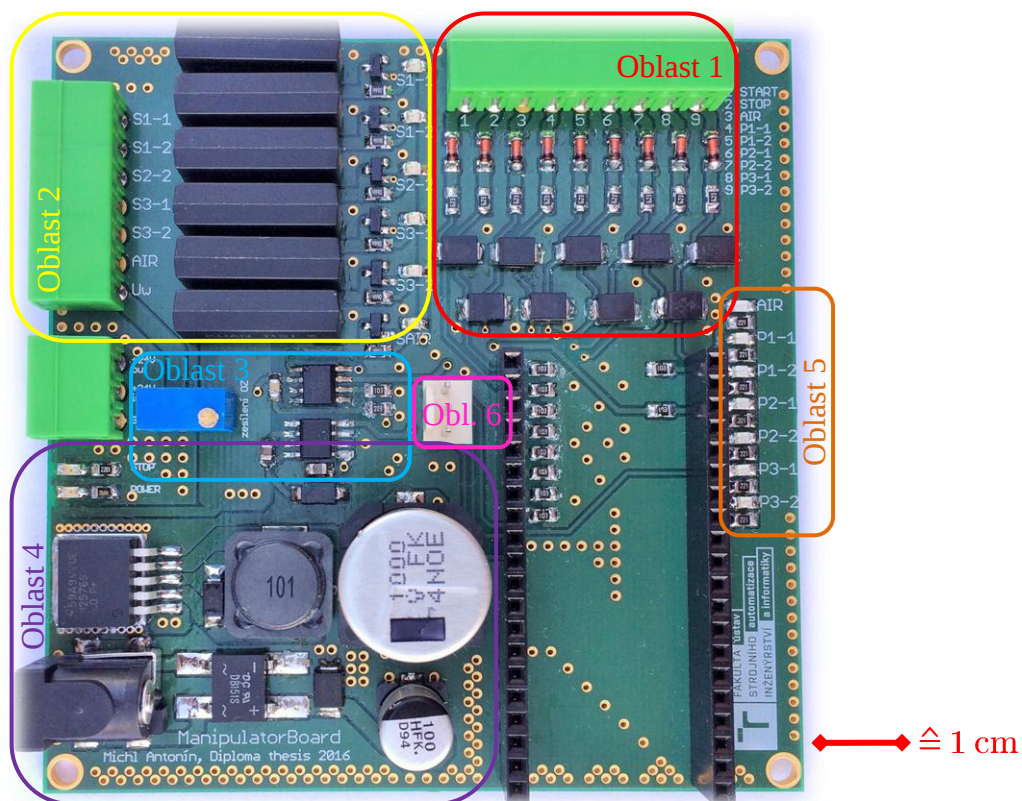


Obr. 43 Ukázka neosazené desky plošného spoje - strana TOP.

Součástky byly osazovány a pájeny pomocí ruční páječky, v některých případech byla použita cínová pasta. Nejprve byly osazeny SMD součástky, poté součástky vývodové. Osazování a „oživování“ bylo prováděno postupně pro jednotlivé sekce a vždy byla provedena kontrola správné funkce a proměření jednotlivých sekcí před osazením dalších. Ukázka osazené desky plošného spoje je uvedena na Obr. 45.



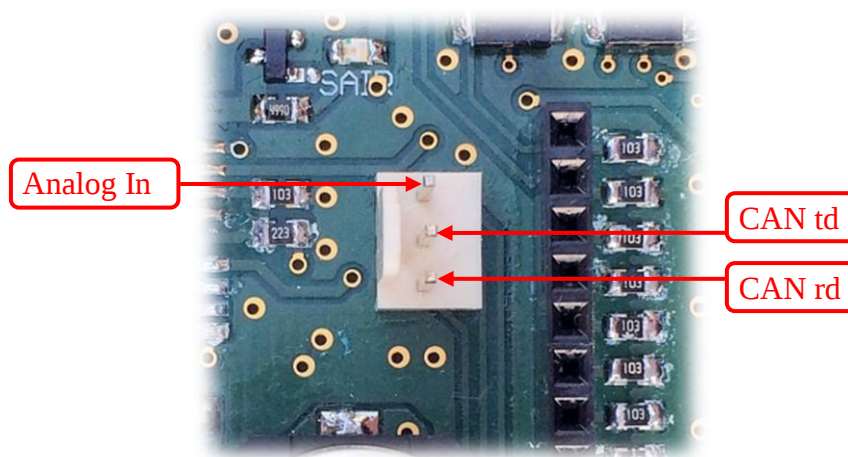
Obr. 44 Ukázka neosazené desky plošného spoje - strana BOTTOM.



Obr. 45 Ukázka osazené desky - strana TOP.

Navrženou desku lze rozdělit na pět základních funkčních oblastí (Obr. 45):

- Červeně označená oblast 1 slouží pro snímání vstupů. Zelená násuvná vidlice je určena pro připojení konektoru PTR AK1550/9-3.5 a zapojení odpovídá dle levé části Obr. 27.
- Žlutě označená oblast 2 je navržena pro realizaci výstupů. Zelená násuvná vidlice (PTR STL1550/7G-3.5-H) je určena pro připojení násuvné svorkovnice PTR AK1550/7-3.5. Jsou zde použity digitální tranzistory BCR523E6327, jazýčková relé COSMO RELES1A 050 D00 a LED diody pro indikaci aktivního relé. Zapojení odpovídá dle Obr. 26.
- Modře označená oblast 3 realizuje obvod s operačním zesilovačem zapojeného dle Obr. 28. V této oblasti se nachází kalibrační potenciometr (64 Y 5K), zapojený ve zpětné vazbě operačního zesilovače LM741 (v oblasti horní integrovaný obvod), který slouží k úpravě výsledného zesílení. V této oblasti je dále umístěn měnič ICL7660ACBAZA (umístěný pod operačním zesilovačem) sloužící k přeměně kladného vstupního napětí (5 V) na výstupní stejně veliké, ale záporné napětí (-5 V).
- Fialově označená oblast 4 označuje oblast zapojení zdroje. Zapojení těchto součástek odpovídá dle Obr. 29. Je zde umístěn např. Graetzův můstek pro ochranu proti přepólování a transil SM6T27A pro ochranu proti zvýšenému napětí. Oranžově svítící LED s popiskem „POWER“ signalizuje správnou funkci zdroje, červeně svítící LED s popiskem „STOP“ signalizuje (pokud nesvítí) stisknuté nouzové central stop tlačítko na panelu manipulátoru.
- Oranžově označená oblast 5 realizuje indikaci aktivních vstupů z oblasti 1.
- Růžově vyznačená oblast 6 zobrazuje umístění rozšiřujícího konektoru. Detailnější znázornění je provedeno na Obr. 46. Analog In slouží k připojení externího snímače polohy s analogovým výstupem v rozsahu (0 až 3,3) V. Zbývající piny tohoto konektoru lze využít k připojení CAN sběrnice.



Obr. 46 Ukázka rozšiřujícího konektoru.

5.2 Kalibrace zesílení operačního zesilovače

Dle rovnice (1)(1) a (2) v kapitole 4.1.2 byl proveden výpočet potřebného zesílení operačního zesilovače a příslušných rezistorů. Toto zvolené zapojení slouží k řízení proporcionálního ventilu a tudíž k řízení lineárního pohonu.

Kalibrace zesílení je v tomto daném případě velmi důležitá, protože bylo experimentálně zjištěno, že řízený lineární pohon nemá střední polohu při hodnotě řídicího napětí 5 V (v důsledku odlišnosti tlaků levého a pravého pístu) a měřením (pomocí osciloskopu) bylo zjištěno, že je nutné provést kalibraci zesílení až na konkrétním zapojení. Další možností je provést kalibraci a nastavení referenční hodnoty pomocí softwaru, tato možnost však nebyla zvolena. Experimentálně byla zjištěna střední poloha proporcionálního ventilu při 5,4 V při řídicím napětí z mBedu 1,6 V. Pro tyto hodnoty bylo provedeno nastavení příslušného potenciometru (potenciometr je na desce plošného spoje označen potiskem „zesílení OZ“) tak, aby výstup odpovídal tomuto požadavku.

5.3 Optimalizace parametrů regulátoru

Pro zvolené řešení byl realizován diskrétní proporcionálně sumačně diferenční regulátor v přírůstkovém tvaru. Volitelné parametry pro daný regulátor jsou:

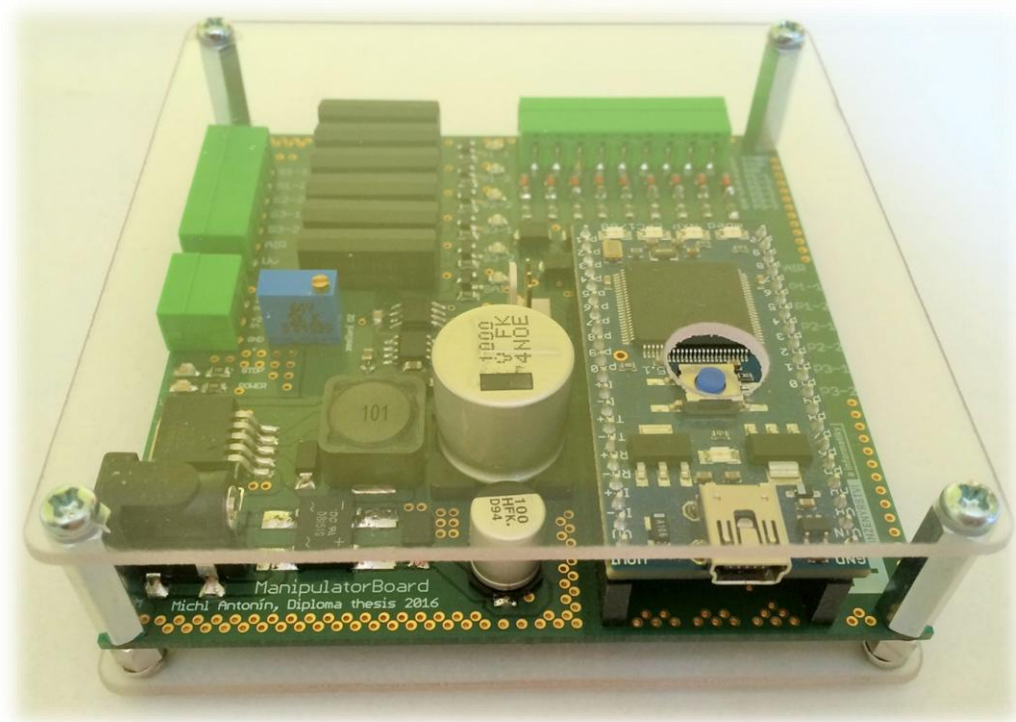
- r_0 - hodnota zesílení,
- T_i - integrační časová konstanta,
- T_d - derivační časová konstanta,
- T - vzorkovací perioda.

Jelikož integrovaný odměřovací systém lineárního pohonu není funkční, byl pro testování regulátoru připojen externí snímač (Festo MLO-POT-450-TLF) s analogovým výstupem (0 až 10) V [28], který byl pomocí odporové děličky převeden na příslušný měřitelný rozsah mBedem (0 až 3,3) V. Měřicí rozsah tohoto snímače byl však méně než poloviční oproti možné dráze manipulátoru, proto bylo testování značně omezené a bylo nutné zajistit, aby nedošlo k poškození některých z částí soustavy, například při rozkmitání při seřizování regulátoru. Proto bylo rameno manipulátoru spojeno se snímačem polohy pomocí střížného členu, který v případě překročení maximální délky zajistí bezpečnost svým přetržením. Experimentálně byly nalezeny a zvoleny tyto hodnoty parametrů nastavení regulátoru: $r_0 = 1$, $T_i = 140$, $T_d = 0,038$ a $T = 0,01$. Dosažená přesnost polohování byla naměřena s odchylkou ± 8 mm. Soustava je nelineární (vlivem suchého tření) a její dynamika je závislá na tlaku vzduchu v systému, proto je doporučeno hodnoty parametrů optimalizovat pro konkrétní úlohu a konkrétní odměřovací systém.

6 EXPERIMENTY NA REÁLNÉ SOUSTAVĚ

Řídicí jednotka byla po jejím sestavením a proměření připojena k manipulátoru a PC. Byly testovány všechny funkce jednotky i řídicího programu zejména:

- komunikace s navrženým řídicím softwarem,
- komunikace s jiným softwarem,
- schopnost dosahovat požadovaných stavů,
- správnost funkce PSD regulátoru,
- správnost funkce operačního zesilovače,
- detekce chybových stavů,
- vizualizace,
- demonstrativní ukázka bez připojení PC,
- nouzové zastavení,
- řízení pomocí programu,
- řízení přímé.



Obr. 47 Ukázka dokončené řídicí jednotky.

Pro testování kompatibility dané řídicí jednotky (Obr. 47) s jiným softwarem byl volen software Tera Term. Jedná se terminálovou aplikaci, která umožňuje komunikaci přes USB, a lze ji tedy použít s navrženým řídicím systémem. Během testování byly optimalizovány hodnoty pro časovače, například pro kontrolu chybových stavů (v důsledku přechodových dějů).

Navržená řídicí jednotka, navržený řídicí software pro mBed a řídicí software pro PC prokázaly během testování správnou, tzn. požadovanou a očekávanou funkci. V příloze na přiloženém CD je uvedena video ukázka navržené řídicí jednotky a řídicího softwaru v provozu.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést návrh a realizaci řídicí jednotky pneumatického manipulátoru, tzn. navrhnout vhodnou strukturu této řídicí jednotky, implementovat ji do modelu manipulátoru, navrhnout software pro řízení tohoto manipulátoru a tento navržený řídicí systém prakticky otestovat.

Tato práce se po úvodu v kapitole 2 zabývá možnostmi řízení manipulátorů, uvádí základní typy řízení, jejich možné dělení a příslušnou vhodnost použití.

V kapitole 3 je uvedena a popsána daná řízená soustava. V této kapitole je dále proveden popis zvoleného značení a názvosloví, technická specifikace, popis a požadavky jednotlivých komponent manipulátoru. Byla provedena identifikace a proměření vodičů, byl vytvořen model daného manipulátoru v programu FluidSIM, na kterém byla provedena simulace a experimentální nalezení vhodných teoretických parametrů PID (PSD) regulátoru.

V další kapitole 4 je proveden návrh hardware (volba řídicí jednotky, návrh napěťového přizpůsobení a návrh desky plošného spoje), návrh řídicího software pro mBed a řídicího software pro PC včetně vizualizace. Bylo zjištěno (experimentálně ověřeno), že absolutní odměřování polohy lineárního pohonu není funkční, proto byla navržená deska plošného spoje rozšířena o další konektor určený pro pozdější připojení (rozšíření) měřicího členu, a pro experimentální ověření funkčnosti navrhovaného systému byl připojen externí snímač polohy. Realizaci desky plošného spoje, kalibraci zesílení operačního zesilovače a optimalizaci parametrů regulátoru popisuje kapitola 5.

Po proměření a ověření správné funkčnosti navržené desky plošného spoje a uvedených softwarů bylo přistoupeno k implementaci a testování navrženého řídicího systému na daném manipulátoru, kde byly testovány požadované funkce. Navržená řídicí jednotka, navržený řídicí software pro mBed a řídicí software pro PC prokázaly během testování správnou (požadovanou) funkci. Video ukázka demonstrující funkčnost tohoto systému je uvedena v příloze 1.

Všechny cíle práce byly splněny. Řídicí systém je připraven pro nasazení do laboratoře pro daný manipulátor.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma ovládání.....	15
Obr. 2 Schéma regulace.....	15
Obr. 3 Schéma regulačního obvodu.....	16
Obr. 4 Ukázka programovatelného regulátoru a regulátoru teploty [4][2].....	17
Obr. 5 Ukázka PXI [5].....	18
Obr. 6 Ukázka PLC [6].....	18
Obr. 7 Ukázka mikrořadiče [8].....	19
Obr. 8 Ukázka řízeného manipulátoru.....	21
Obr. 9 Schéma zvoleného označení stavů.....	21
Obr. 10 Jednotka pro úpravu vzduchu.....	22
Obr. 11 Schéma manuálně ovládaného ventilu [9].....	22
Obr. 12 Schéma redukčního ventilu s filtrem [12].....	23
Obr. 13 Schéma elektricky ovládaného ventilu [13].....	23
Obr. 14 Ventilový terminál.....	23
Obr. 15 Elektromagnetický ventil pro terminál CPV [17].....	24
Obr. 16 Proporcionální průtokový ventil.....	24
Obr. 17 Schéma proporcionálního ventilu [17].....	25
Obr. 18 Závislost průtoku na řídicím signálu [19].....	25
Obr. 19 Ilustrace lineárního pohonu [20].....	26
Obr. 20 Princip čelistí [24].....	26
Obr. 21 Ukázka řízené soustavy.....	27
Obr. 22 Ukázka simulovaného průběhu regulace polohy.....	29
Obr. 23 Ukázka modelu řízené soustavy.....	30
Obr. 24 MBed LPC1768 [25].....	31
Obr. 25 Zapojení MCP 2551 [27].....	32
Obr. 26 Zapojení relé.....	33
Obr. 27 Dělič napětí a signalizace.....	33
Obr. 28 Zapojení operačního zesilovače.....	34
Obr. 29 Regulátor napětí.....	35
Obr. 30 Zapojení invertoru napětí.....	35
Obr. 31 Ukázka navržené DPS v měřítku 1:1.....	37

Obr. 32 Ukázka LED označení mBedu.	40
Obr. 33 Ukázka záložky Realtime controlling.	42
Obr. 34 Ukázka ilustrací vybraných jezdců.	43
Obr. 35 Ukázka informační zprávy.	43
Obr. 36 Ukázka záložky Program controlling.	44
Obr. 37 Ukázka nalezení syntaktické chyby programu.	45
Obr. 38 Ukázka prvního spuštění řídicího software.	46
Obr. 39 Připojení mBedu.	46
Obr. 40 Ukázka postupu pro spuštění manipulátoru.	47
Obr. 41 Ukázka karty Parameters settings.	48
Obr. 42 Ukázka karty Program controlling.	48
Obr. 43 Ukázka neosazené desky plošného spoje - strana TOP.	49
Obr. 44 Ukázka neosazené desky plošného spoje - strana BOTTOM.	50
Obr. 45 Ukázka osazené desky - strana TOP.	50
Obr. 46 Ukázka rozšiřujícího konektoru.	51
Obr. 47 Ukázka dokončené řídicí jednotky.	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Identifikace vodičů.	28
Tab. 2 Ukázka možné CAN zprávy s informací o poloze.	30
Tab. 3 Ukázka zpracování požadavku psd.	38
Tab. 4 Ukázky vybraných řídicích zpráv.	38
Tab. 5 Ukázka kódu Getstate.	39
Tab. 6 Ukázka kódu pro zásah.	40

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [2] *Řídicí systémy: součást projektu CZ.1.07/2.2.00/0406*. Dostupné také z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/216277/mod_resource/content/2/prednaska-01.pdf
- [3] *Automa: Programovatelné regulátory teploty* [online]. 2004, 2004(03) [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://automa.cz/programovatelne-regulatory-teploty-32241.html>
- [4] *Amit: Programovatelné regulátory* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.amit.cz/cz/products/programmable_controllers.htm
- [5] *PXI* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.edn.com/electronics-news/4389547/ADLink-expands-PXI-PXIe-instrument-family-4389547>
- [6] *Siemens PLC* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://www.siemens.com>
- [7] NĚMEC, Zdeněk. *Aplikovaná elektronika*. 5. 2015. Dostupné také z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/188293/mod_resource/content/2/Aplikovan%C3%A1%20elektronika_2015_aa.pdf
- [8] *NXP microcontrollers* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/documents/other/75015816.pdf>
- [9] *Spínací ventil datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/170681
- [10] *Redukční ventil s filtrem datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/162719
- [11] *Digitální manometr datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENUS/PDF/US/SDE1_ENUS.PDF
- [12] *Digitální manometr* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/162719
- [13] *Elektricky ovládaný ventil datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/172956
- [14] *Ventilový terminál datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/18200
- [15] *Elektromagnetický ventil datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/161415
- [16] *Elektromagnetický ventil datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/161414

- [17] *Festo* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/index.htm
- [18] *Rezervní deska datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/161368
- [19] *Proporcionální průtokový ventil datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405209/8040802d2.pdf>
- [20] *Lineární pohon DGP/DGPL datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: [http://edge.rit.edu/edge/P08605/public/Festo\(Linear_Drive\).pdf](http://edge.rit.edu/edge/P08605/public/Festo(Linear_Drive).pdf)
- [21] *Linear drives DGPI/DGPIL datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/369558/DGPIL_en.pdf-29.11.2013-15-15-39.pdf
- [22] *Saně Mini datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/170564
- [23] *Snímač koncové polohy datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/datasheet/cs_cz/150855
- [24] *Chapadlo datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/406649/682514d6.pdf>
- [25] *MBed pin table* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://developer.mbed.org/users/fraserphillips/notebook/mbed-gpio-pin-table/>
- [26] *MBed LPC1768 datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1769_68_67_66_65_64_63.pdf
- [27] *MBed CAN* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <https://developer.mbed.org/handbook/CAN>
- [28] *Displacement encoders datasheet* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENGB/PDF/EN/MLO-MME_EN.PDF

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - přiložené CD-R médium, které obsahuje:

- elektronickou verzi této diplomové práce ve formátu PDF,
- zdrojový kód řídicího programu pro PC,
- zkompilovanou aplikaci,
- zdrojový kód řídicího programu pro mBed,
- zkompilovaný řídicí program pro nahrání do mBedu,
- soubory programu „Eagle“ obsahující schémata zapojení a návrh DPS,
- textové soubory s demo programy pro řídicí software,
- výkresy pro výrobu krytů v programu AutoCad ve formátu PDF,
- video ukázky.

Příloha 2 - Tabulka řídicích zpráv.

Příloha 3 - Tabulka chybových kódů.

Příloha 4 - Osazovací schéma.

Příloha 5 - BOM.

Příloha 6 - DPS strana TOP.

Příloha 7 - DPS strana BOTTOM.

Příloha 8 - Schémata zapojení.

Příloha 9 - Výkresy pro výrobu krytů.

Příloha 10 - Pneumatické schéma řízené soustavy.

Příloha 2 – tabulka řídicích zpráv

požadavek:	řídicí zpráva:
zablokování jednotky	i0do
odblokování jednotky	i1do
heartbeat (frekvence min 2 Hz)	tt
zapnutí vzduchu	a1do
vypnutí vzduchu	a0do
požadavek - p11	q1do
požadavek - p12	q2do
požadavek - p21	w1do
požadavek - p22	w2do
požadavek - p31	e1do
požadavek - p32	e2do
Požadavek – psd: polohu je nutno zadat ve formátu pp16*Xdo, kde 16*X je myšleno 16 bitů reprezentujících decimální číslo požadavku polohy. Uvedená zpráva je pro požadavek polohy 28.	pp00000000000011100do
Požadavky lze zadat současně v jedné zprávě ve formátu Y ₁ X ₁ ...Y _n X _n PP16*Xdo, kde Y vyjadřuje prefix požadovaného příkazu, X jeho hodnotu a „do“ vyjadřuje provedení předvolené scény. Příkaz „do“ lze poslat samostatně. Pořadí ani počet parametrů zprávy se nezohledňuje. Ukázka je volena pro požadavek p11, p22, zapnout vzduch, odblokovat. Dále psd 29, p32 a p12.	q1a1w2i1do e2pp00000000000011101q2do
Nastavení parametrů regulátoru: formát zprávy ssXYZQ, kde symboly XYZQ značí 24 bitů pro každý z nich, reprezentujících parametry (celá čísla!) v pořadí R ₀ T T _i T _d . Po přijetí jsou čísla dělena 1000. Ukázka zprávy je pro nastavení R ₀ = 8; T = 0,01; T _i = 400; T _d = 5. (Tzn. posílané hodnoty musí být *1000 a musí respektovat omezení parametrů PSD regulátoru dle teorie řízení.)	ss0000000000001111101000000 00000000000000000000001010 000001100001101010000000 0000000000001001110001000
Kompletní info. Na tento příkaz bude poslána zpráva s informací o požadovaných a aktuálních stavech (pož. pX, vzduch, poloha, požadavek na aktualizaci scény, pož. blokace, parametry regulátoru, aktuální pX, vzduch a psd).	nn

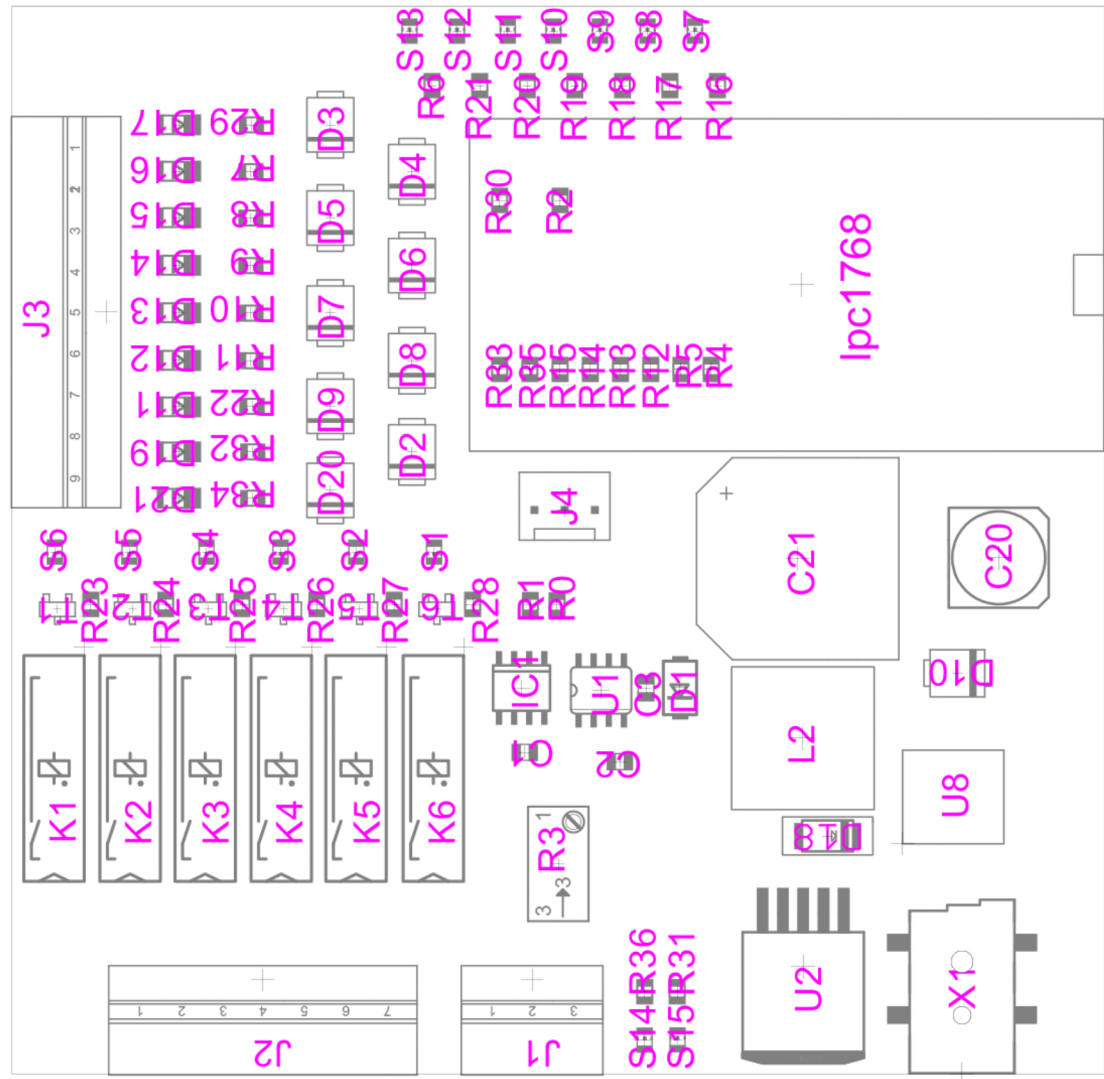
Dotaz na definovanou skupinu stavů. Příchozí zpráva bude ve formátu: "a%db%dc%dd%de%df%d", kde budou čísla za písmenem odpovídat stavům v pořadí p1, p2, p3, vzduch, aktuální poloha, stav blokace.	xx
Dotaz na konkrétní aktuální položku. X je parametr dotazu. Pro: X= 1 bude vrácen stav p1, X= 2 bude vrácen stav p2, X= 3 bude vrácen stav p3, X= 4 bude vrácen stav vzduchu, X= 5 bude vrácen stav polohy, X= d hodnota pro ladění časovačů (dovolená hodnota pro přechodové děje z důvodu blokace), X= c hodnota pro ladění - definovatelná, X= 9 požadavek na aktualizaci proměnných, X= i bude vrácen stav blokace, X= x bude vrácen parametr regulátoru q0, X= y bude vrácen parametr regulátoru q1, X= z bude vrácen parametr regulátoru q2, X= u bude vrácena hodnota pinu p18.	mX
Aktivace měření analogového vstupu: X= 1 zapnuto, X= 0 vypnuto, hodnota nastavena na 50%.	cX
Zrušení funkce heartbeat: X= 1 vyžadováno, X= 0 nevyžadováno.	tX

Příloha 3 – tabulka chybových kódů

chybový kód:	význam:
9901	Nesprávný parametr ř. zprávy pro p1 (např. q3).
9902	Nesprávný parametr ř. zprávy pro p2 (např. q7).
9903	Nesprávný parametr ř. zprávy pro p3 (např. qe).
9904	Nesprávný parametr ř. zprávy pro vzduch (např. a8).
9905	Nesprávná binární data v parametru pp řídící zprávy.
9906	Nesprávná binární data v prvním parametru ss ř. zprávy.
9907	Nesprávný parametr ř. zprávy pro blokaci.
9908	Neplatný parametr dotazu mX.
9916	Nesprávná binární data v druhém parametru ss ř. zprávy.
9926	Nesprávná binární data v třetím parametru ss ř. zprávy.
9936	Nesprávná binární data v čtvrtém parametru ss ř. zprávy.
9801	Nevyhovující parametry regulátoru.
9955	Neplatná přichoží zpráva (syntaktická chyba).
-9802	Nesprávné volání funkce getparam.
-9811	Chyba čidel pohybu p1 (nedefinovaný stav).
-9812	Chyba čidel pohybu p2 (nedefinovaný stav).
-9813	Chyba čidel pohybu p3 (nedefinovaný stav).
-9899	Otevřený ventil, ale nedostatečný tlak vzduchu.
-9898	Nedostatečný tlak v systému.
-9803	Nesprávné volání funkce getstate.
9701	Chyba datashare - chybný zápis.
9702	Chyba datashare - chybné čtení.
9703	Nesprávné volání datashare.

chybový kód proměnné „i“ (Info - „On“):	význam:
0	Blokace uživatelem.
1	Zapnuto, neblokováno.
-555	Blokováno v důsledku nesprávného „heartbeat“.
-89	Blokováno v důsledku ukončení dema.
-7	Blokováno v důsledku chybového stavu.
-8	Inicializační hodnota lokální proměnné jednotky (blokováno).
-9	Inicializační hodnota metody datashare (blokováno).

Assembly Top



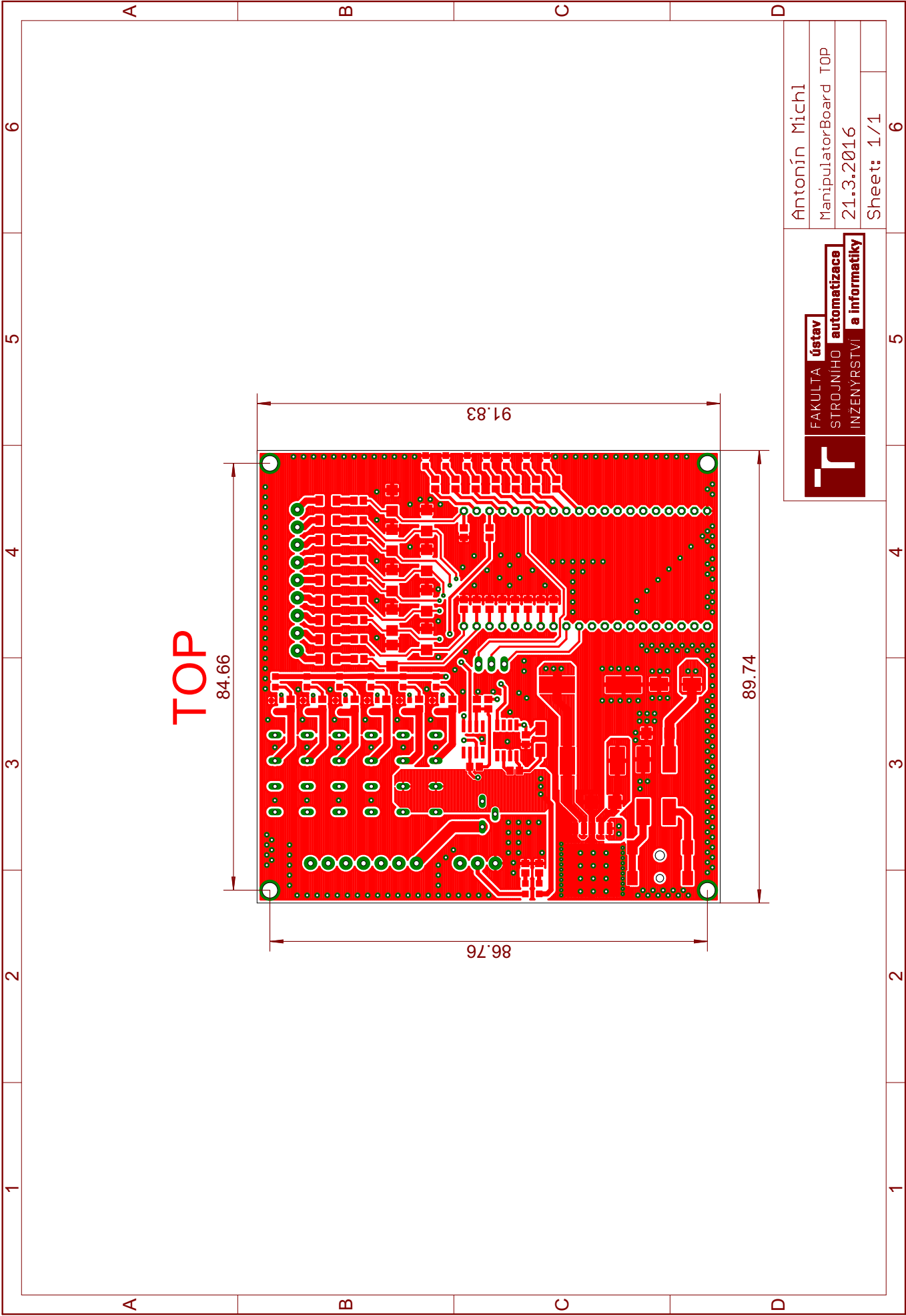
Příloha 5 - BOM

označení výrobce	ks.	hodnota	pouzdro	zkratky	popis
08055C104K4T2A	1	0,1 uF	0805	C1	Multilayer ceramic capacitors MLCC - SMD/SMT 0805 0.1uF 50volts X7R 10%.
C0805C106K4PAC	2	10 uF	0805	C2, C3	Multilayer ceramic capacitors MLCC - SMD/SMT 16volts 10uF 10% X5R.
CE100/50-SMD	1	100 uF	0810	C20	Electrolytic capacitors; SMD; 100uF; 50V; ±20%.
EEVFK1H102M	1	1000 uF	J16	C21	Aluminium Electrolytic Capacitors - SMD 1000uF 50V.
BYG20J-E3/TR	1	600 V/1,5 A	DO214AC	D1	Rectifier diode; SMD; 600V; 1,5A; DO214AC.
SMBJ5.0A-E3/52	9	5 V/65,2 A	DO214AA	D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D20	TVS Diodes - Transient Voltage Suppressors 600W 5.0V 5% Uni.
SM6T27A	1	23,1 V (600 W)	DO214AA	D10	TVS Diodes - Transient Voltage Suppressors 600W 27V Unidirect.
LL4150	9	50 V/150 mA	SOD80	D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17, D19, D21	Rectifier diode; SMD; 50V; 150mA; MiniMELF, SOD80.

15MQ040NTRPBF	1	40 V/1,5 A	DO214AC	D18	Schottky Diodes & Rectifiers 1,5 Amp 40 Volt.
LM741 SMD	1		SO8	IC1	Bipolar operational amplifiers; +-18 (36) V; 0,5 V/us.
ZL262-20SG	2		DIL40_0.9	LPC1768	PIN:20; direct; 2,54mm; THT; 1x20; 3A.
OM11043	1		DIL40_0.9	LPC1768	Development Boards & Kits - ARM mBed 1768 Demo Board.
ARK1550H3STL	1		3X3,5-H	J1	Plug-fork; 3 PIN; pitch 3,5mm; 160V; 9A.
ARK1550H7STL	1		7X3,5-H	J2	Plug-fork; 7 PIN; pitch 3,5mm; 160V; 9A.
ARK1550H9STL	1		9X3,5-H	J3	Plug-fork; 9 PIN; pitch 3,5mm; 160V; 9A.
PSH02-03PG	1		PSH02-03P	J4	Connector with lock; DPS; 3 PIN; pitch 2,54mm.
RELSIA05D500	6		REED	K1, K2, K3, K4, K5, K6	Electromagnetic relay; power 5 V (0,05 W), max. 0,5 A.
DE1207-100	1	100 uH	1207	L2	Inductor: wire; 100uH; 2.1A; 151mΩ; SMD; 12x12x8mm; ±20%; -40÷85°C.
LM2576S-5.0/NOPB	1	5 V/3 A	TO263	U2	Voltage stabiliser; switched mode, fixed step down; 5V; 3A; TO263; SMD.
0805S8J0223T5E	1	22k	0805	R0	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 22kΩ; 0,125W; ±5%; - 5÷125°C.

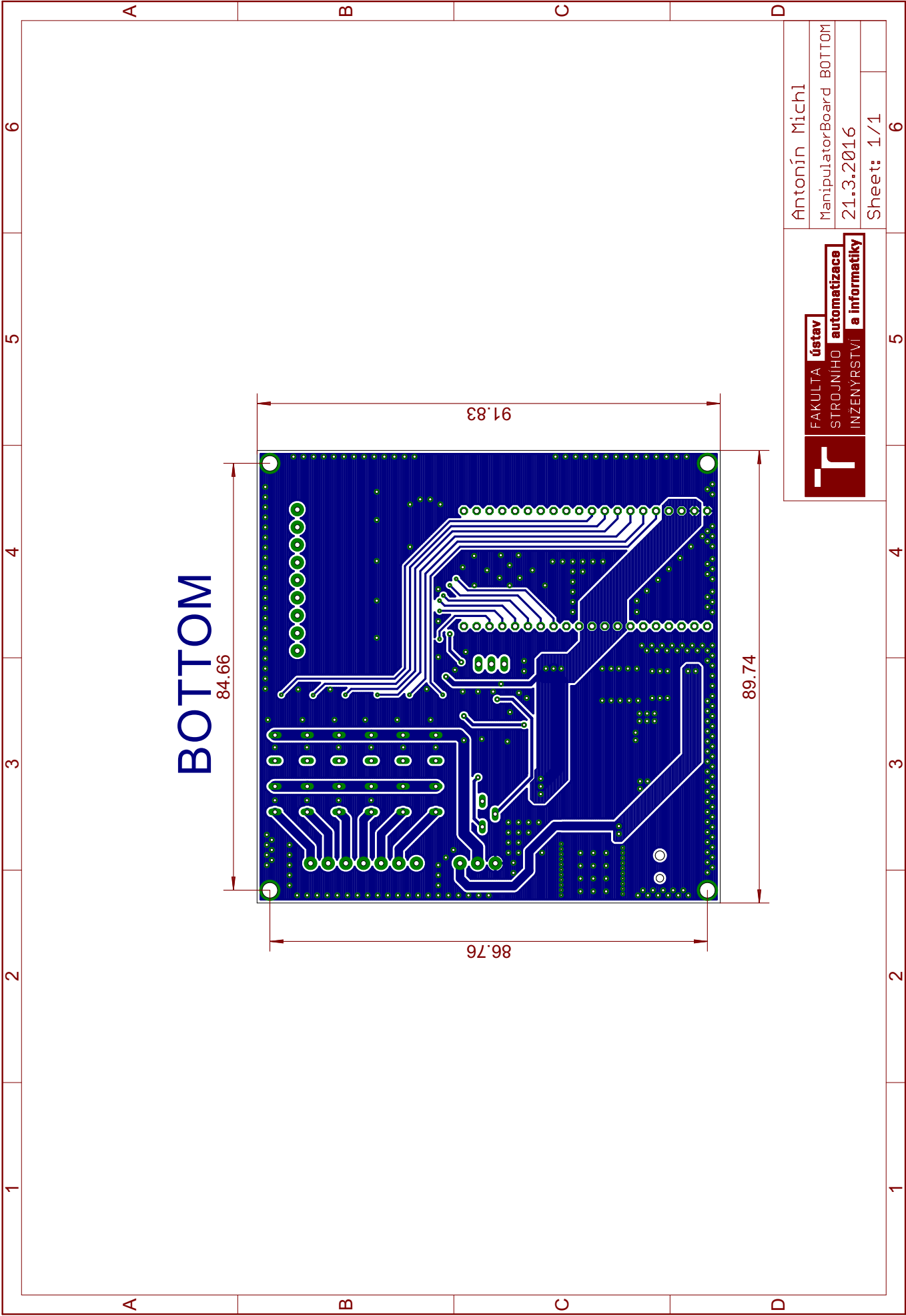
0805S8J0103T5E	11	10k	0805	R1, R2, R4, R5, R12, R13, R14 R15, R30, R33, R35	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 10kΩ; 0,125W; ±5%; -55÷125°C.
M64Y502KB40	1	5k	S64Y	R3	Trimmer Resistors - Through Hole 3/8"SQ 5Kohms Multi Turn Cermet.
0805S8J0221T5E	7	220R	0805	R6, R16, R17, R18, R19, R20, R21	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 220Ω; 0,125W; ±5%; -55÷125°C.
0805S8J0623T5E	9	62k	0805	R7, R8, R9, R10, R11, R22, R29, R32, R34	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 62kΩ; 0,125W; ±5%; -55÷125°C.
CRCW0805499RFK TABC	7	499R	0805	R23, R24, R25, R26, R27, R28, R31	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 499Ω; 0,125W; ±1%; -55÷155°C.
CRCW08052K20FK EA	1	2k2	0805	R36	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 2,2kΩ; 0,125W; ±1%; -55÷155°C.
KP-2012SGC	6	2,5 V/20 mA	0805	S1, S2, S3, S4, S5, S6	LED; SMD; 0805; green; 4-15mcd; 2x1.25mm; 120°; 2.2÷2.5V; 20mA.

OF-SMD2012B	7	3,2 V/20 mA	0805	S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13	LED; SMD; 0805; blue; 150-200mcd; 2x1.25mm; 120°; 3÷3.2V; 20mA.
KP-2012EC	1	2,5 V/20 mA	0805	S14	LED; SMD; 0805; red; 4-12mcd; 2x1.25mm; 120°; 2÷2.5V; 20mA; λd:625nm.
OSO50805C1E	1	2,6 V/20 mA	0805	S15	LED; SMD; 0805; orange; 100-120mcd; 2x1.25x0.8mm; 120°; 2÷2.6V; 20mA.
BCR523E6327	6		SOT23	T1, T2, T3, T4, T5, T6	Transistor: NPN; bipolar; 50V; 500mA; 330mW; SOT23.
ICL7660ACBAZA	1		SO08	U1	DC-DC converter; Uin:1.5÷12V; Uout: -1.5÷-12V; SO8.
DB151S	1		DB-1S	U8	Bridge rectifier; 50V; 1.5A; DB-1S.
1613 14	1		1613_14	X1	Socket; DC supply; male; 5,5/2,1mm; 5.5mm; 2.1mm; on PCBs; SMT; 2.5A.

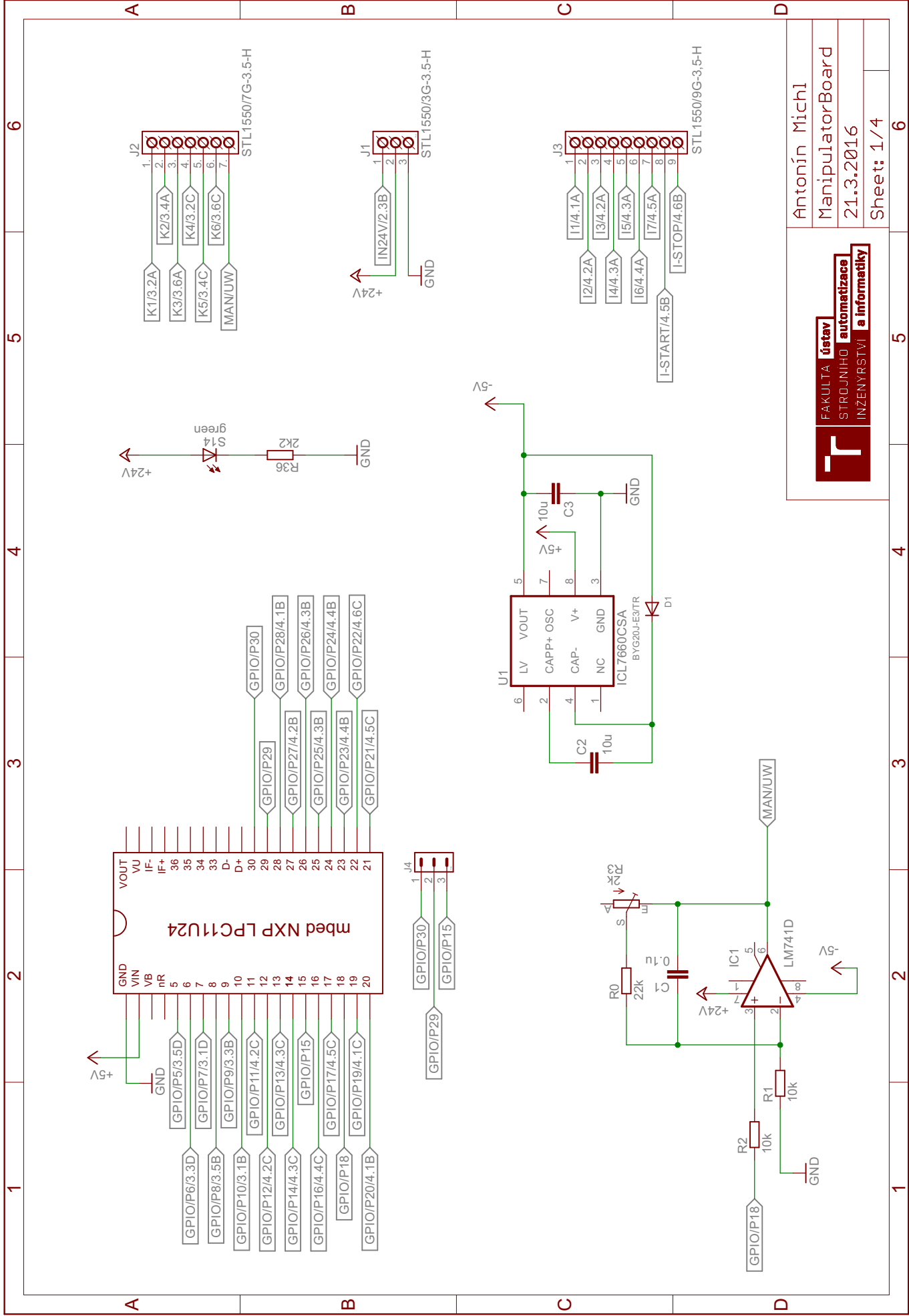


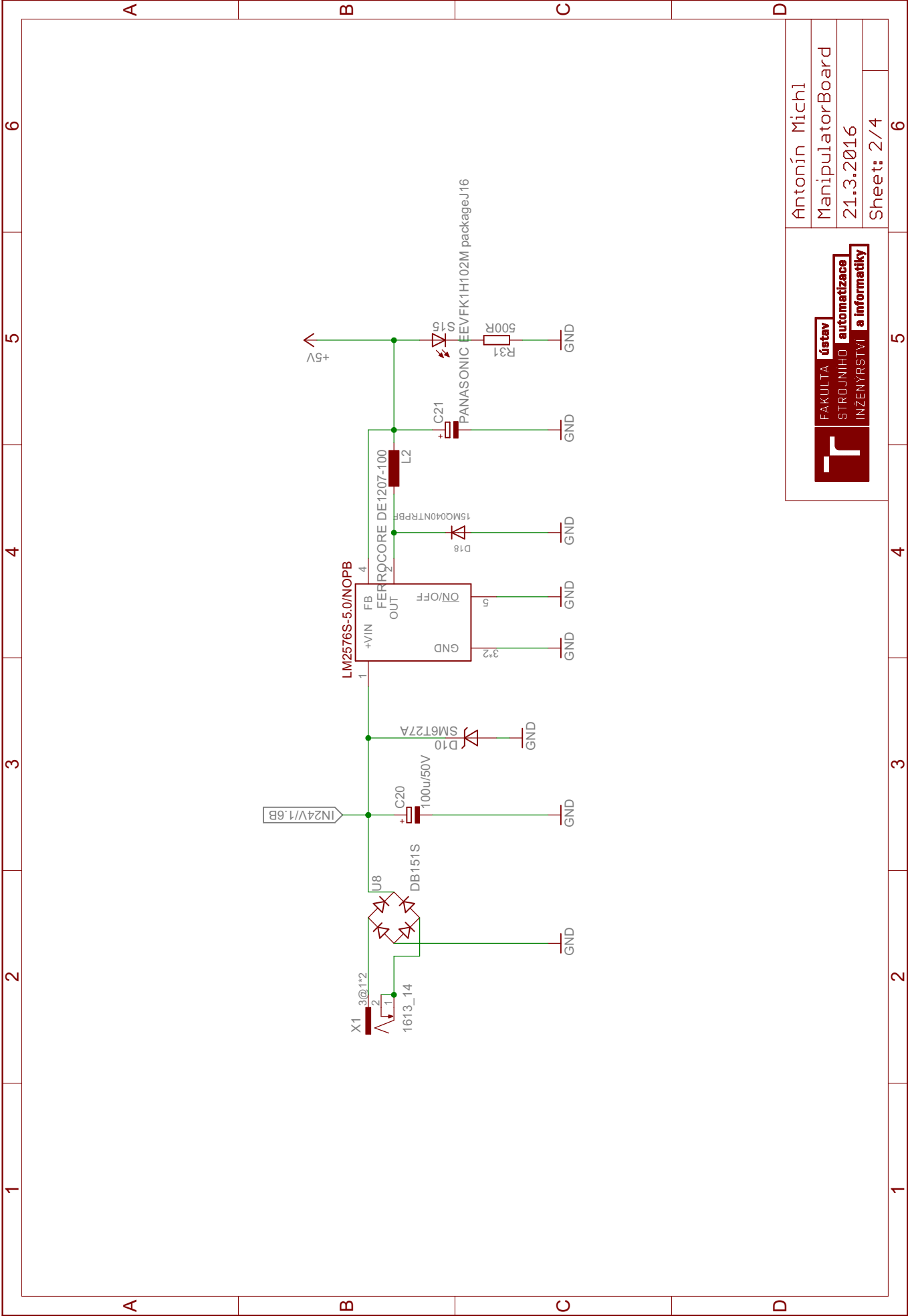
	Antonín Michl
	ManipulatorBoard TOP
	21.3.2016
	Sheet: 1/1

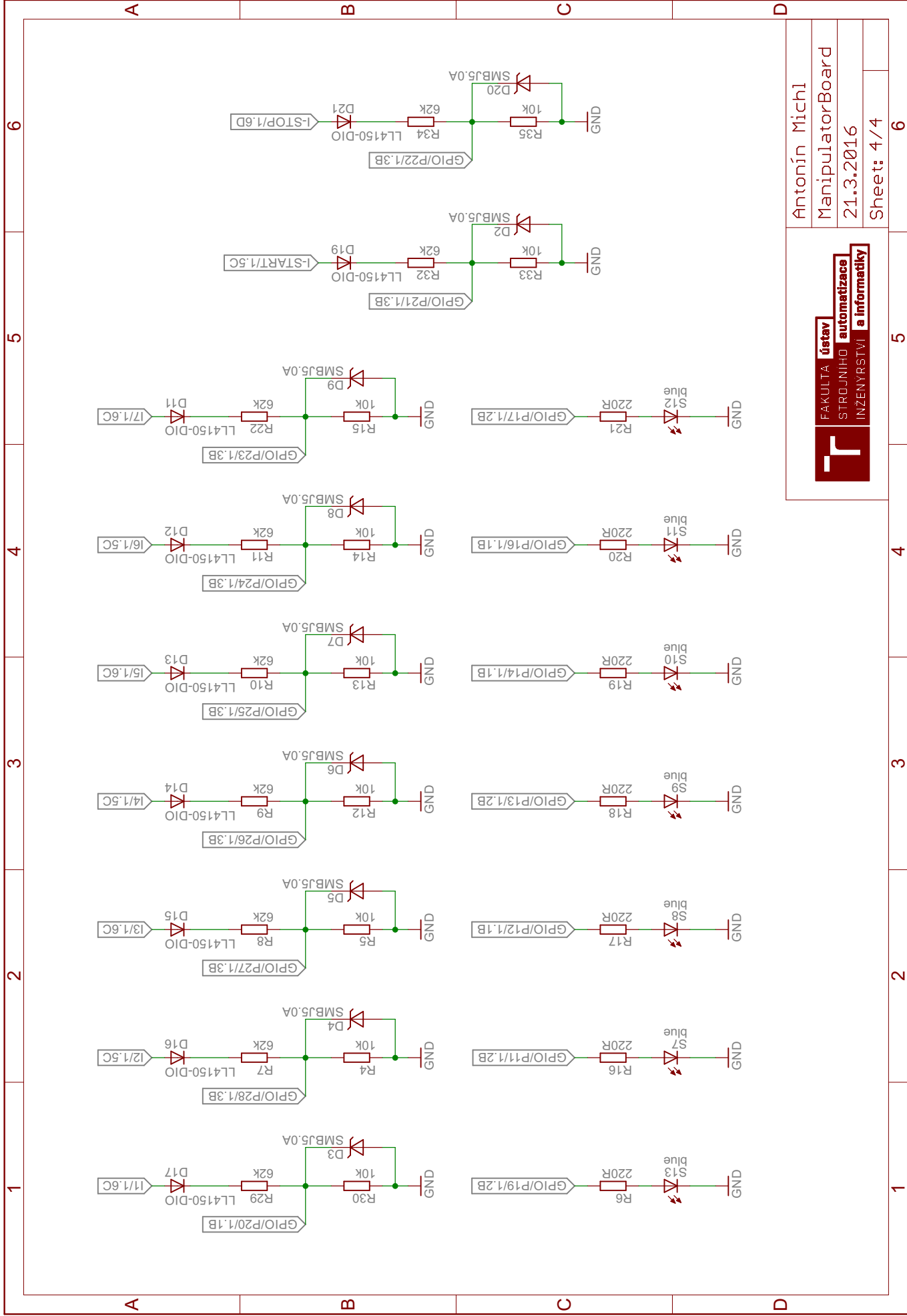
FAKULTA Ústav
STROJNÍHO automatizace
INŽENÝRSTVÍ a informatiky



	FAKULTA	ústav	
	STROJNÍHO	automatizace	
	INŽENÝRSTVÍ	a informatiky	
			Antonín Michl
ManipulatorBoard BOTTOM			
21.3.2016			
Sheet: 1/1			





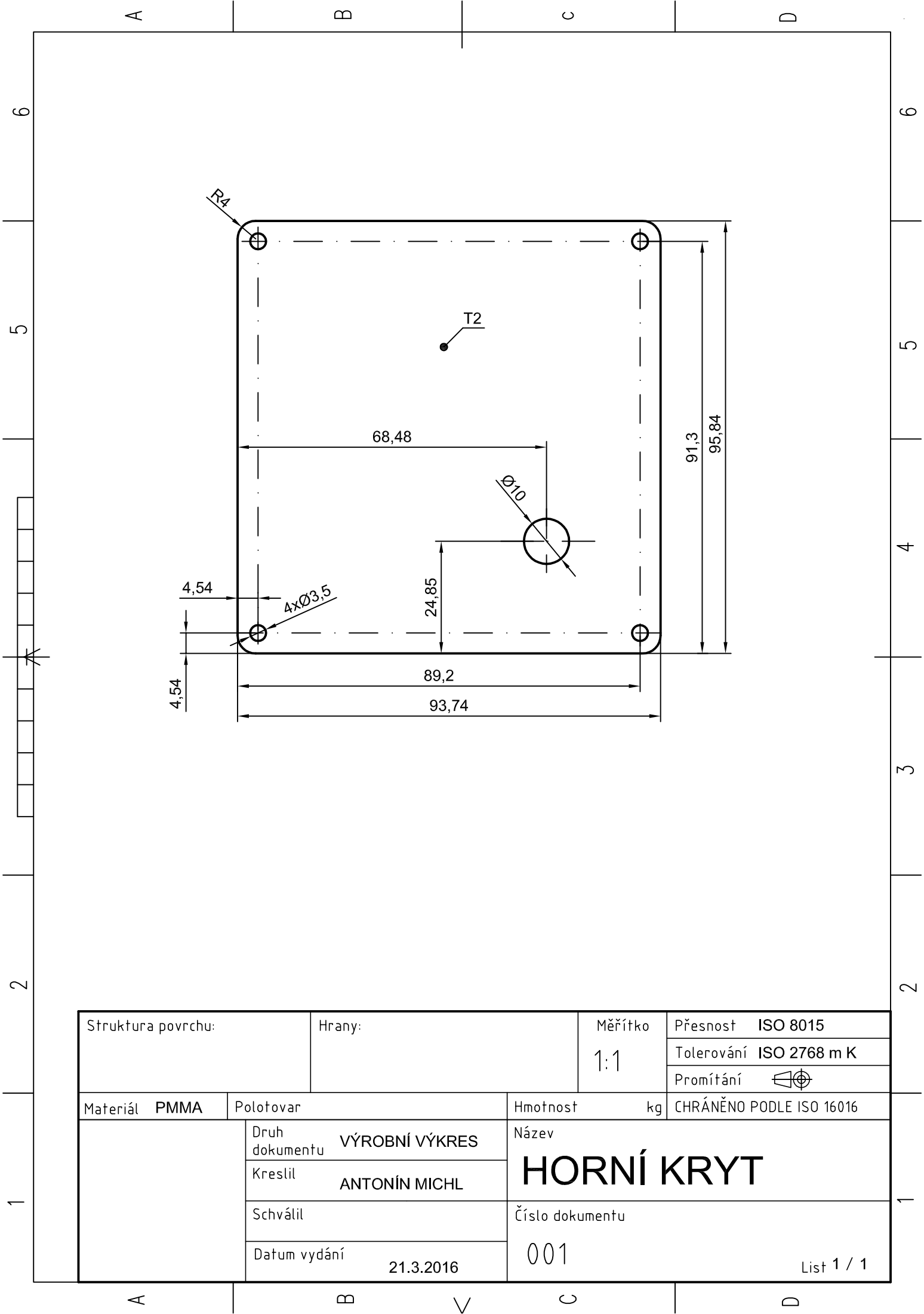


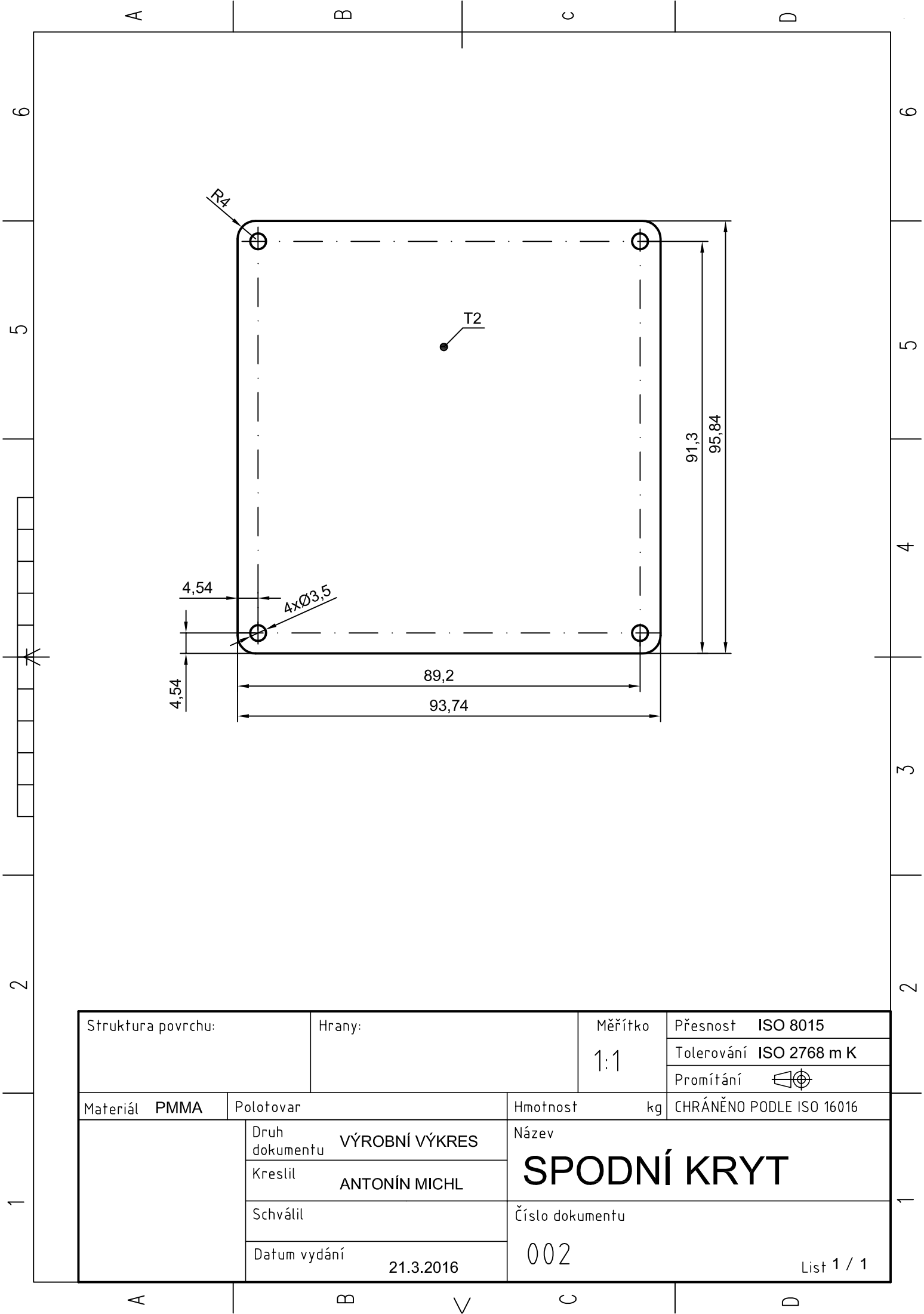
Antonín Michl

ManipulatorBoard

21.3.2016

Sheet: 4/4





Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko 1:1	Přesnost	ISO 8015	
					Tolerování		ISO 2768 m K
					Promítání		
Materiál	PMMA	Polotovár		Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
		Druh dokumentu		Název SPODNÍ KRYT			
		VÝROBNÍ VÝKRES					
		Kreslil		Číslo dokumentu 002			
		ANTONÍN MICHL					
		Schválil		List 1 / 1			
		Datum vydání					
		21.3.2016					



ABC

