

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## Simulátor skutečné lokomotivy pro modelovou železnici

**Martin Šturc**

Školitel: Ing. Jiří Zemánek  
Obor: Kybernetika a robotika  
Zaměření: Systémy a řízení  
Květen 2018



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šturm** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **434825**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Studijní obor: **Systemy a řízení**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Simulátor skutečné lokomotivy pro modelovou železnici**

Název bakalářské práce anglicky:

**Simulator of real locomotive for model railway**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je vytvořit jednoduchý simulátor řízení lokomotivy, který pomocí hardwarových ovládacích prvků a simulace dynamiky přiblíží ovládání modelové železnice vedení skutečného vlaku .

1. Popište řízení a dynamiku lokomotivy v rozsahu nutném pro vytvoření simulátoru. Stručně popište používané způsoby řízení mašinek na modelové železnici.
2. Cílem simulátoru je zachytit základní charakter dynamiky lokomotivy (vlaku), není potřeba vytvořit věrný matematický model.
3. Navrhněte systém tak, aby byl modifikovatelný a rozšiřitelný: různé komunikační protokoly, lokomotivy bez dekodéru, simulace různých lokomotiv, rozšiřování řídicího pultu.
4. Vytvořte základní matematický model lokomotivy (vlaku), který bude simulovat rychlost pro zadané řídicí povely - jízdní kontrolér, směrový kontrolér, elektrodynamická brzda, brzdiče atd. Model by měl umožnit například simulaci různého počtu vagonů.
5. Sestavte jednoduchou testovací verzi fyzického řídicího pultu - stačí základní ovládací prvky, ukazatele a indikátory.
6. Navrhněte a realizujte systém pro připojení panelu, simulaci matematického modelu v reálném čase a řízení modelových lokomotiv.
7. Proveďte a zdokumentujte funkci celého systému - ovládání modelové lokomotivy pomocí řídicího pultu se simulací dynamiky.

Seznam doporučené literatury:

1. Brown, Forbes T. Engineering system dynamics: a unified graph-centered approach. CRC press, 2006.
2. Karnopp, Dean C., Donald L. Margolis, and Ronald C. Rosenberg. System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems. John Wiley & Sons, 2012.
3. Moler, Cleve B. Numerical Computing with MATLAB, <https://www.mathworks.com/moler/chapters.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jiří Zemánek, katedra řídicí techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **28.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Jiří Zemánek  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Poděkování

Děkuji ČVUT, že mi je tak dobrou *alma mater*. Děkuji mému vedoucímu za poskytnutí množství cenných rad a informací.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne .....

.....

Podpis

## Abstrakt

Cílem práce je navrhnout a implementovat jednoduché mechanické, elektrické a softwarové řešení pro simulaci lokomotivy.

**Klíčová slova:** Loco363, ModuCab, Modelová železnice

**Školitel:** Ing. Jiří Zemánek  
ČVUT FEL, Katedra řídicí techniky,  
Karlovo náměstí 13/E,  
Praha 2

## Abstract

The goal of this thesis is to design and implement a simple mechanical, electrical and software solution for simulation of locomotive.

**Keywords:** Loco363, ModuCab, Modelová železnice

**Title translation:** Simulator of real locomotive for model railway

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Lokomotiva</b>	<b>3</b>
2.1 Konstrukce	3
2.2 Řídicí stanoviště	4
2.3 Parametry	5
2.4 Odvozené typy	5
2.5 Výkres	6
<b>3 Ovládací pult</b>	<b>7</b>
3.1 Konstrukce	7
3.2 Panely	8
3.2.1 P-H-L	8
3.2.2 P-D-L	9
3.2.3 P-D-S	11
3.2.4 P-D-P	12
3.3 Prvky	13
3.3.1 Páka pro ovládání válců řídicího kontroléru	13
3.3.2 Terčový ukazatel	16
3.4 Propojení	16
3.5 Spojení s PC	17
<b>4 Software</b>	<b>19</b>
4.1 ModuCab	19
4.2 Model - Loco363	19
4.3 Zpracování výstupů	20
4.4 Spouštění	20
<b>5 Modelová železnice</b>	<b>21</b>
5.1 Analogové ovládání	22
5.1.1 Lineární řízení	22
5.1.2 Pulzně šířková modulace	22
5.1.3 Více lokomotiv, úseky, detekce obsazení	23
5.1.4 Ovládání přídatných funkcí	23
5.1.5 Příslušenství	24
5.2 Digitální řízení	25
5.2.1 Příslušenství	25
5.2.2 Detekce obsazení, úseky	26
<b>6 Závěr</b>	<b>27</b>
<b>A Panely</b>	<b>29</b>
<b>B Páka</b>	<b>35</b>
<b>C Terčový ukazatel</b>	<b>39</b>
<b>D Literatura</b>	<b>43</b>

## Obrázky

2.1 Lokomotiva 362.121-6 (zdroj: Atlas lokomotiv, David Švestka) . . .	3
2.2 Řídicí pult lokomotivy 363.055-5 (zdroj: Atlas lokomotiv, David Švestka) . . . . .	4
2.3 Typový výkres (zdroj: Atlas lokomotiv) . . . . .	6
3.1 Značení panelů a prvků ovládacího pultu . . . . .	7
3.2 Značení prvků panelu PHL . . . . .	8
3.3 Značení prvků panelu PDL . . . . .	9
3.4 Box nahrazující PDL spínače . . .	10
3.5 Značení prvků panelu PDS . . . . .	11
3.6 Celkový pohled na testovací PDS panel . . . . .	12
3.7 Značení prvků panelu PDP . . . . .	13
3.8 Páka - tělo . . . . .	14
3.9 Páka - vnitřek . . . . .	14
3.10 Univerzální deska rozvodu . . . . .	18
5.1 Ovládací transformátor PIKO FZ1 . . . . .	23
A.1 Mechanický výkres panelu PDL	30
A.2 Mechanický výkres panelu PDS	31
A.3 Mechanický výkres panelu PDP	32
A.4 Mechanický výkres panelu PDB	33
B.1 Schéma páky - 1. strana . . . . .	36
B.2 Schéma páky - 2. strana . . . . .	37
C.1 Schéma ukazatele - 1. strana . . .	40
C.2 Schéma ukazatele - 2. strana . . .	41

## Tabulky

5.1 Přehled modelových měřítek . . .	21
--------------------------------------	----





# Kapitola 1

## Úvod

Cílem práce je vytvoření pultu pro ovládání modelové železnice obdobným způsobem jako ve skutečné lokomotivě, resp. především vytvoření jednotlivých softwarových i hardwarových komponent. Dále pak vytvoření dynamického modelu, který bude simulovat jízdu lokomotivy, příp. celého vlaku.

Finální částí by mělo být napojení výstupu z tohoto modelu do modelového kolejiště, aby se tak modelová lokomotiva chovala a ovládala realističtěji.



## Kapitola 2

### Lokomotiva

Zvolenou lokomotivou je elektrická dvousystémová lokomotiva Škoda 69E (ČD 363). Lokomotiva byla zvolena s ohledem na složitost ovládacího pultu, modelu a v neposlední řadě také díky faktu, že se jedná o elektrickou lokomotivu.



**Obrázek 2.1:** Lokomotiva 362.121-6 (zdroj: Atlas lokomotiv, David Švestka)

### 2.1 Konstrukce

Lokomotiva je skříňového typu s unifikovanými stanovišti strojvedoucího na obou koncích.

Je postavena na dvou dvounápravových podvozcích, v každém podvozku jsou na obou osách uloženy trakční motory s cizím buzením. V každém pod-

vozku jsou motory spojeny vždy sériově, podvozky pak paralelně. Buzení je spojeno sériově přes všechny motory s možností přemostění podvozku (motorové skupiny) při poruše.

Řízení motorů je provedeno přes pulzní měniče, každá motorová skupina má vlastní blok měničů pro řízení kotev, buzení je (vzhledem k sériovému zapojení motorů) řízeno společným měničem. Jmenovité napětí trakčních motorů činí 1,3 kV při provozu na stejnosměrném systému a 1,15 kV na střídavém systému. Maximální trvalý proud kotev je 715 A.

Lokomotiva je vybavena těž elektro-dynamickou brzdou (EDB). Sběr proudu zajišťují dva polopantografové sběrače na střeše s pneumatickým olvádáním. Sběrače jsou univerzální a slouží pro oba napájecí systémy. Přepínání napájecího systému je provedeno až za nimi kombinovanými prepínači/uzemňovači systémů na střeše. Tyto jsou ovládány pneumaticky z řídicího stanoviště při volbě trakčního systému. Uzemňovače sběračů jsou ovládané ručně ze strojovny.

## 2.2 Řídicí stanoviště

Stanoviště je unifikovaného typu s místem pro strojvedoucího a pomocníka.



**Obrázek 2.2:** Řídicí pult lokomotivy 363.055-5 (zdroj: Atlas lokomotiv, David Švestka)

Stanoviště je vybaveno hlavním kontrolérem (ovládán 3 válci (páky na pultu) - směrový, jízdní a brzdový). Kontrolérem se zadává požadovaný poměrný tah při ručním řízení, případně požadovaná rychlost v automatickém

režimu s regulátorem rychlosti.

Dále je vybaveno brzděčem přímočinné (lokomotivní) brzdy DAKO-BP s přímým řízením pneumatických systémů a ovladačem DAKO-OBE1 ovládajícím elektrický brzděč samočinné průběžné vlakové brzdy DAKO-BSE umístěný ve strojovně.

Jsou zde také ovládací prvky pro jízdu v automatickém režimu - rychloměr s ukazateli požadované a skutečné rychlosti, zadávací souprava tlačítek („klávesnice“), přepínač omezení poměrného tahu / účinnosti EDB, a souprava pro měření délky vlaku a předvolbu rychlosti v úseku následujícím po úseku s omezenou rychlostí.

Mimo toho je z pultu taktéž ovládáno přepínání trakčního systému, řízení hlavních vypínačů, sběračů, kompresorů, ventilátorů a dalších součástí lokomotivy. Na pultu je také umístěna radiostanice Tesla systému TRS (Traťový rádiový systém), jejíž anténa je umístěna na střeše lokomotivy.

## 2.3 Parametry

Vybrané parametry lokomotivy:

Trakční systémy	3 kV = 25 kV / 50 Hz ~
Služební hmotnost	87 t
Průměr nových dvojkolí	1250 mm
Průměr opotřebovaných dvojkolí	1180 mm
Trvalá tažná síla	177 kN
Maximální tažná síla	260 kN
Maximální brzdná síla EDB	162 kN
Trvalý výkon [=]	3 480 kW
Trvalý výkon [~]	3 060 kW
Trvalý výkon EDB	3 000 kW
Maximální výkon	4 950 kW
Trvalý proud kotev	715 A
Maximální proud kotev	1 100 A
Maximální proud buzení	110 A
Trvalá rychlost [=]	66,5 km/h
Trvalá rychlost [~]	59 km/h
Maximální rychlost	120 km/h

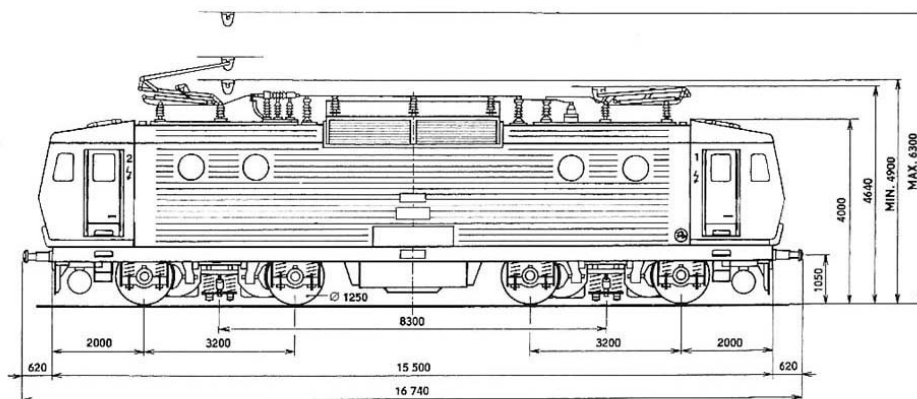
Zdroj: Atlas lokomotiv [1]

## 2.4 Odvozené typy

Od lokomotivy 363 jsou odvozené typy 163 (pouze stejnosměrný napájecí systém) a 263 (pouze střídavá trakce). Modernizací pak vznikly typy 362,

resp. 162, 262, které mají mj. odlišné zpřevodování a dosahují tak maximální rychlosti 140 km/h.

## 2.5 Výkres

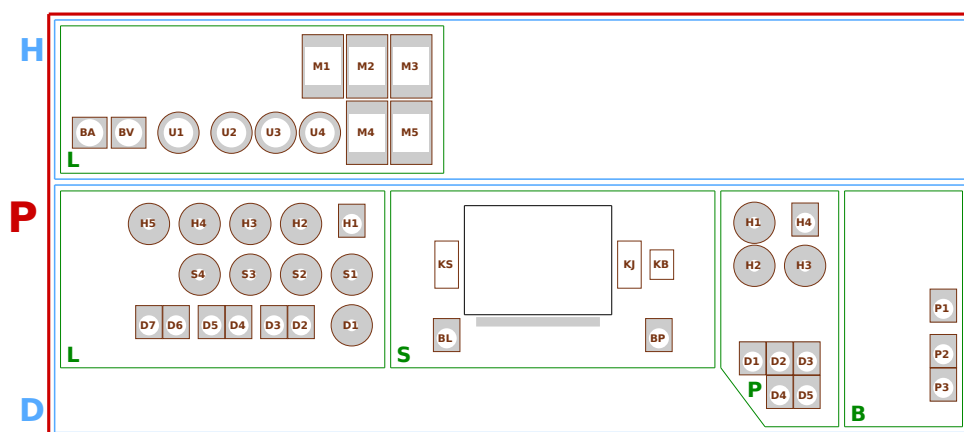


Obrázek 2.3: Typový výkres (zdroj: Atlas lokomotiv)

## Kapitola 3

### Ovládací pult

Pult je rozdělen na samostatné panely stejně jako ve skutečnosti. Pro zjednodušení orientace byly panely i jejich jednotlivé prvky označeny (viz. Figure 3.1). Značení je nicméně vlastní, s reálným značením se neshoduje.



Obrázek 3.1: Značení panelů a prvků ovládacího pultu

Všechny uvedené nákresy se však týkají pouze několika panelů. Je to z důvodu jejich modulárního generování skriptem, pro který je tudíž třeba znát polohu daných prvků. Skript pak umožňuje vygenerovat i výkresy pro vrtání/řezání do panelu. Rozkreslené s rozměry však jsou dosud jen některé panely a to jen s některými prvky (ty s již stanovenými rozměry). Další prvky a panely se budou doplňovat s případným dalším rozvíjením práce.

### 3.1 Konstrukce

Vzhledem k rozsáhlosti pultu je tento stále ve stadiu částečného rozpracování. Jako nosné části panelů byla zvolena borová překližka tloušťky 6 mm. Dřevo bylo zvoleno z důvodu snadného opracování, kdy i v domácích podmínkách lze s příslušnými nástroji (vrtáky) v panelu snadno udělat potřebně velké otvory pro jednotlivé prvky.

Jak se však již nyní ukazuje, borová překližka nebyla úplně nejlepší volbou, protože se celkem snadno zkroutí. Příště by bylo vhodné zvolit překližku

patrně bukovou (dle doporučení dotázaného truhláře).

V tuto chvíli není nikterak připraven samotný rám panelu. Předpokladem nicméně byla jeho výroba z menších latí, ke kterým se panely přišroubují skrz pomocí dlouhých šroubů M4 do narážecích matic. Tyto latě by tak ze stran zasahovaly cca 2 cm pod panely, čemuž bylo uzpůsobeno rozmístění jednotlivých prvků.

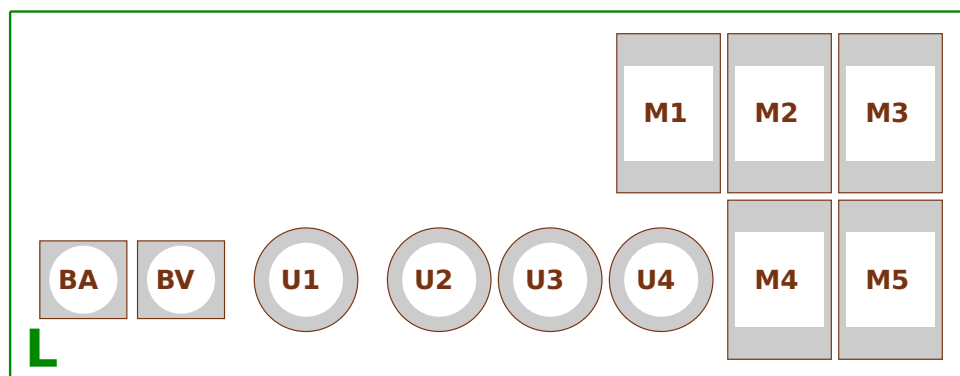
Rozměry základního pultu byly nakonec stanoveny na  $150 \times 65$  cm s tím, že horní panely mají výšku 25 cm a dolní od 30 cm nalevo po 40 cm napravo. Rozměry samotných panelů je možné nalézt v příloze ve výkresech pro vrtání/řezání (viz. A Panely).

Bohužel se nepodařilo získat výkresy skutečné lokomotivy, ani se dostat na stanoviště pro rozměření. Všechny rozměry se tak víceméně odvíjely od několika málo fotografií skutečného pultu, ve kterých byly jako referenční rozměr použity prvky Elektropřístroj řady T6 se známým průměrem 30 mm. Ač nevychází přesazení panelů vůči fotografiím, zvolené rozměry víceméně vyhovují rozmístění prvků a jejich rozestupům. Pro jednoduchou domácí repliku je tato přesnost v každém případě dostatečná.

## 3.2 Panely

Níže jsou uvedeny některé ovládací prvky z jednotlivých panelů. Jejich téměř kompletní seznam včetně povolených hodnot lze najít ve zdrojových kódech v GIT repozitáři „MCDData“.

### 3.2.1 P-H-L



Obrázek 3.2: Značení prvků panelu PHL

Tento panel obsahuje následující prvky:

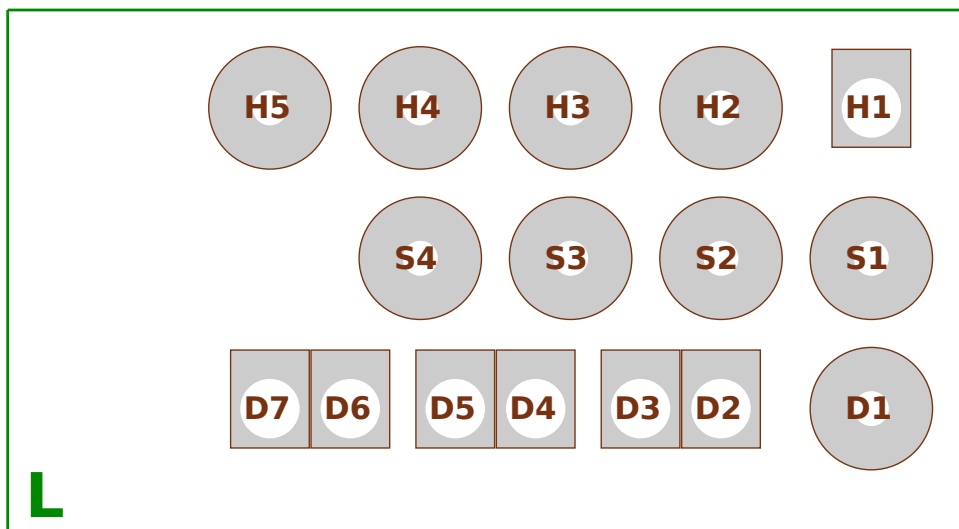
- BA = ampérmetr baterie
- BV = voltmetr baterie
- U1 = terčový ukazatel zapnutí vlakového topení



- U2 = terčový ukazatel zapnutí stejnosměrného hlavního vypínače
- U3 = terčový ukazatel napájecího systému
- U4 = terčový ukazatel zapnutí střídavého hlavního vypínače
- M1 = trolejové napětí DC
- M2 = trolejové napětí AC
- M3 = proud kotev první motorové skupiny (1-2)
- M4 = proud buzení
- M5 = proud kotev druhé motorové skupiny (3-4)
- R = radiostanice Tesla TRS (nezakreslena, vyplňuje levou horní čtvrtinu panelu)

Prakticky jsou z nich však funkční jen ukazatele U2-U4. V modelu pak je ještě základní ovládání M1 a M2, avšak na výrobu měřáků vůbec nedošlo.

### ■ 3.2.2 P-D-L



**Obrázek 3.3:** Značení prvků panelu PDL

Z tohoto panelu je do modelu začleněna značná část prvků:

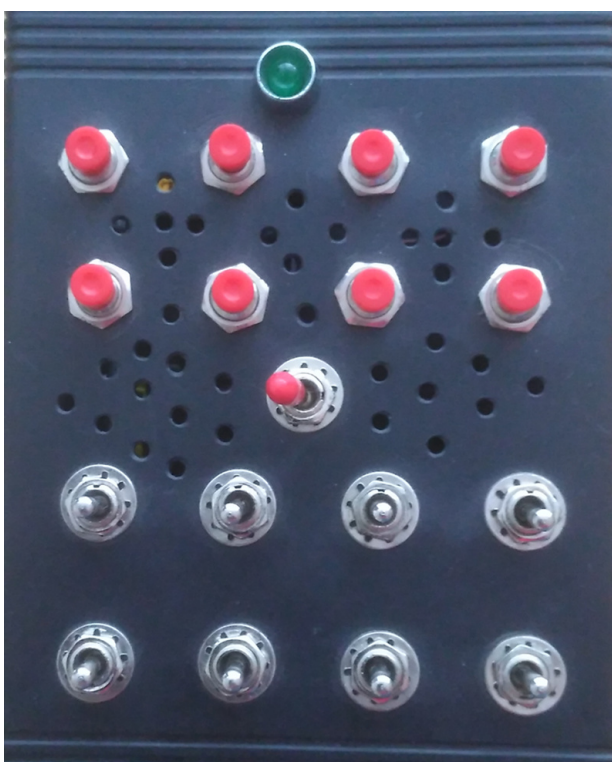
- H2 = přepínač systémů a ovladač HV
- H3 = nouzová jízda
- H5 = spínač řízení
- S1 = sběrače

- D1 = reflektor
- D2 = osvětlení kabiny
- D3 = podsvit přístrojů
- D4-D7 = poziční světla

Zbylé spínače pak model zatím vůbec neřeší:

- H1 = nouzové vypnutí HV
- H4 = vlakové topení
- S2 = kompresor 1 a pomocný kompresor
- S3 = kompresor 2
- S4 = ventilátory

Ani začleněné spínače však nejsou vyrobené (běžný otočný spínač s takto variabilním uspořádáním pozic jsem nenašel), nicméně pro jejich ovládání je využito několika páčkových přepínačů a tlačítek v boxu (Figure 3.4), kterými je jejich ovládání nahrazeno.



**Obrázek 3.4:** Box nahrazující PDL spínače

Tlačítka v horní části fungují vždy ve dvojici, přičemž tlačítko nahoru simuluje otočení přepínače o jednu pozici doprava, tlačítko dolů pak o jednu pozici doleva. Zleva pak tlačítka nahrazují spínače H3, D1, H2 a S1.

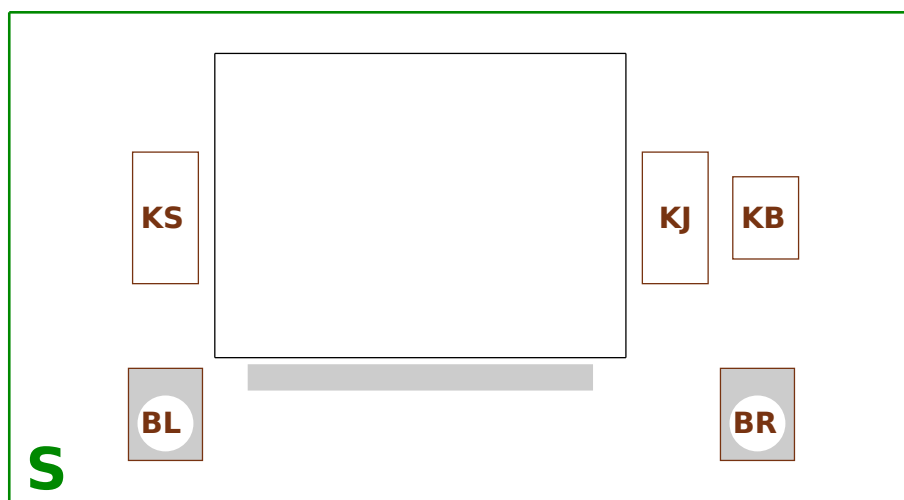
Páčkové přepínače ve spodní řadě pak obdobně nahrazují přepínače D4-D7 (pořadí jako na panelu). Právě dva páčkové přepínače v horní řadě nahrazují D2-D3, opět dle pořadí na panelu. Druhý přepínač zleva pak funguje jako hlavní spínač řízení (H5) a to jen v poloze nahoru.

Poslední přepínač (levý v horní řadě) pak zajišťuje přepínání významu D/A převodníku a k němu připojenému voltmetru:

- nahoru - ukazatel poměrného tahu  $\pm 5$  V, nicméně ukazuje přepočtený celý rozsah tahu ( $\pm 10$  V)
- uprostřed - rychloměr 0-100 km/h
- dolů - tlak v převodníku 0-10 bar (max. tlak převodníku je nicméně 3,8 bar)

Páčkový přepínač s vodorovnou dráhou nemá žádný význam. Uvnitř boxu jsou 3 DPS s 8-bit I/O expandery PCF8574 s doletovanými 10 k $\Omega$  pull-up odpory. Všechny spínače a tlačítka spínají proti zemi.

### ■ 3.2.3 P-D-S



**Obrázek 3.5:** Značení prvků panelu PDS

Na tomto centrálním panelu (nachází se přímo před strojvedoucím) jsou umístěny hlavní ovládací prvky - páky válců hlavního kontroléru a tlačítka bdělosti. Na panelu je pak také místo pro jízdní řád.

Prvky:

- KS = směrový válec hlavního kontroléru
- KJ = jízdní válec
- KB = brzdový válec
- BL, BR = tlačítka bdělosti

Tlačítka bdělosti nejsou zatím třeba, protože model neobsahuje vlakový zabezpečovač. Všechny tři páky hlavního kontroléru pak jsou vyrobené a plně funkční, viz. 3.3.1 Páka pro ovládání válců řídicího kontroléru.

Pro testování je pak na PDS panelu ještě voltmetr napájený z D/A převodníku expanderu PCF8591. Tento voltmetr se pro testování přepíná mezi režimy ukazatele poměrného tahu, rychloměru a manometru převodíku (viz. výše).



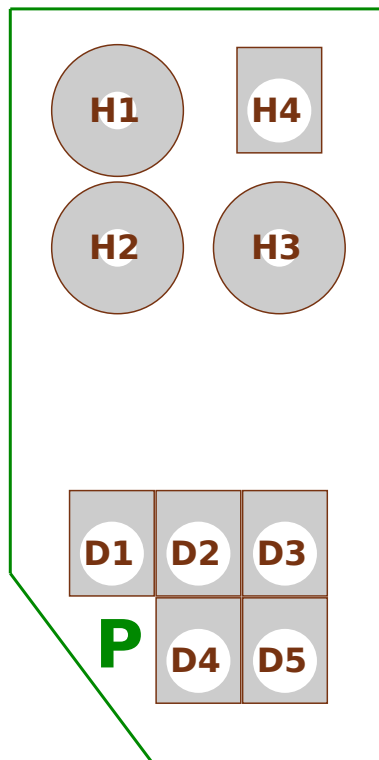
Obrázek 3.6: Celkový pohled na testovací PDS panel

#### 3.2.4 P-D-P

Spínače na panelu:

- H1 = přepínač režimu řízení (R-A-ZK)
- H2 = přepínač režimu jízdy ARR (P-V-J-S)
- H3 = přepínač omezení poměrného tahu ARR
- H4 = volba frekvence vlakového zabezpečovače
- D1 = píšťala
- D2 = pomalá jízda
- D3 = volba druhu vlaku (N-Os)
- D4 = pískování
- D5 = odbrzdovač

Z těchto spínačů čte model jen H1, který však nelze ovládat a je tak stále v základním stavu (ruční). Protože však regulátor rychlosti v modelu není implementován, není třeba jeho polohu měnit.



Obrázek 3.7: Značení prvků panelu PDP

## ■ 3.3 Prvky

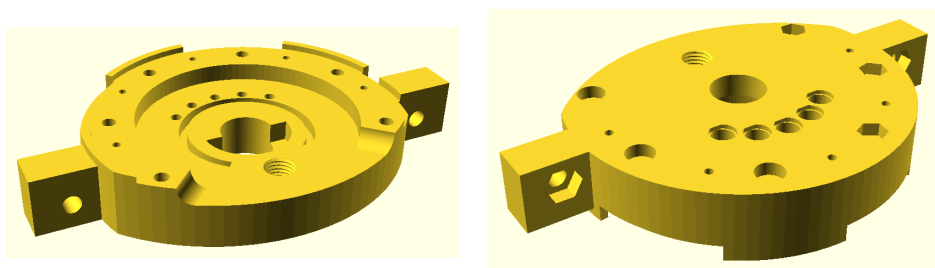
### ■ 3.3.1 Páka pro ovládání válců řídicího kontroléru

Páka je sestavena z několika plastových dílů a dvou plošných spojů. Poloha je snímána pomocí optických závor a clonky. Do systému se připojuje sběrnici I<sup>2</sup>C přes standardizovaný 10-pinový konektor.

#### ■ 3.3.1.1 Konstrukce

Páka je tvořena 2 díly těla a 1 (2) dílem vnitřku. Díly páky jsou vytisknuté z černého plastu ABS na 3D tiskárně. Modely jsou vytvořené pomocí parametrického modelování v programu OpenSCAD, umožňují tedy jednoduchou změnu počtu poloh páky a dalších parametrů.

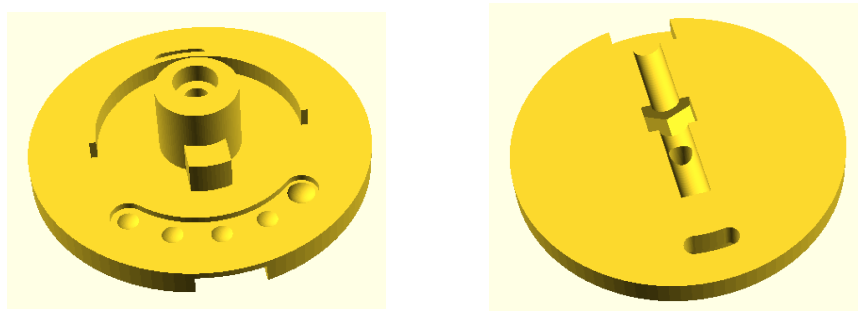
Základem je díl těla, který celou konstrukci drží pohromadě. V něm je otvor pro uložení osy vnitřního „kola“ včetně přípravy pro uložení vratných pružin a zajišťovacího mechanismu poloh. Po obvodu je vytvořeno celkem 6 zámků pro jednoduché slícování s druhým dílem těla. Zámky jsou pootočené, takže pokud nejsou polohy páky asymetrické (což pro vytvářený pult nejsou u žádné ze 3 pák), jsou oba díly stejné. K zajištění pak slouží 6 otvorů pro šrouby M3 spolu s vytisknutými pouzdry pro matky. Díl má rovněž po obou stranách „ušičky“ s pouzdry matek pro přišroubování k panelu šrouby M4.



Obrázek 3.8: Páka - tělo

Do jednoho z dílů je potřeba natlačit infračervené LED, do druhého pak infračervené fototranzistory. Přes ně pak přijde z každé strany specificky osazené DPS, které se k dílu zajistí pomocí 5 vrtů. Díry pro ně jsou cca 2 mm, jako optimální se ukázaly univerzální vruty  $2,5 \times 12$  mm s půlkulatou hlavou. V těle jsou ještě drážky pro možná stínítka na vnitřních „kolech“, která případně více zakryjí snímací fototranzistory před vnějšími vlivy.

Vnitřní „kolo“ je pro tisk rozdělené na dvě poloviny, které jsou následně slepeny acetonem. Pro zajištění a zároveň pro zesílení osy je skrz udělaný otvor pro šroub M3 včetně pouzdra pro matku v jedné straně. Pro připevnění madla je pak uvnitř prostor pro zalepení pojistné matky M4.



Obrázek 3.9: Páka - vnitřek

V „kole“ je vynechán malý otvor pro optickou závoru aktuální polohy, nad ním je přídavné stínítko celého prostoru s fototranzistory. V horní části „kola“ je vytvořená dráha pro zajišťovací mechanismus poloh, kdy podle parametrů modelu je (či není) pro každou polohu vytvořená odpovídající prohlubeň.

### 3.3.1.2 DPS

Páka se skládá ze dvou identických plošných spojů, které musí být specificky osazené a propojené. Tyto plošné spoje se pak osazují vždy z opačné strany - oba tak mají stranu s SMD součástkami vystavenou. Menší výjimkou jsou kondenzátory, které jsou naopak schované směrem k sobě. Pro zjednodušení se desky značí A a B, kde A obsahuje procesor, B pak obsahuje pouze LED a tranzistory podsvitu.

Deska se připojuje ke zbytku systému konektorem CON1 (standardní 10-pin). Propojení s druhou deskou zajišťují konektory CON3 a CON4.

Kondenzátory C3, C7, C9 a C6, C8, C10 zajišťují hlavní filtraci napájecích větví. Důležitější +5 V, napájející procesor, pak má na A desce větší kondenzátor C9-A s kapacitou 100uF.

Z přívodního konektoru je pak vytažena také I<sup>2</sup>C sběrnice a to skrz filtr. Tento filtr se v praxi osvědčil s roboty Lego Mindstorms NXT (ostatně filtr pochází ze schématu od Lego NXT ultrazvukového senzoru), bohužel BusPirate pak s procesory nedokáže komunikovat. Na osazených deskách jsou proto osazené pouze ESD diody D2 a D3 a přemostěné odpory R4, R5. Zbytek filtru je neosazený.

Srdcem desky pak je mikroprocesor Atmel/Microchip AVR ATtiny40 v SMD. Ten má k sobě kondenzátor C1 pro filtraci napájení a na resetovacím pinu pak kondenzátor C2, pull-up odpor R1 a ESD diodu D1. Programování procesoru pomocí rozhraní TPI je vyvedeno na konektor CON2.

Optickou závoru tvoří infračervené LED diody LED1 až LED5 a fototranzistory T6 až T10. K sobě pak mají další odpory, jumpery a tranzistory. Prakticky však bylo zjištěno, že snímání je spolehlivé i s minimem součástek. Pro desku A (snímací) tedy stačí osadit fototranzistory T6 až T10 a spojit jumpery SJ6 až SJ10. Pro desku B (vysílací) je nutno osadit LED1 až LED5 spolu s jejich odpory R16 až R20, překlenout odpory R21 až R25 a spojit jumpery SJ1 až SJ5.

Deska má též přípravu pro podsvit dílu dvěma PWM kanály. Tyto výstupy jsou posíleny tranzistory BC817-25 (T11, T12).

Po výrobě a osazení desek bylo rovněž zjištěno několik nedostatků kolem problematického spojování jumperů SJ1 až SJ5, malých plošek pro kondenzátory C9-B, C10-A/B a chybějící indikace činnosti. V datech je tedy k dispozici upravená verze, která tyto nedostatky odstraňuje. Zároveň však na diagnostické LED dosud není připraven firmware.

### ■ 3.3.1.3 Program

Firmware se skládá z několika samostatných modulů a jednoduché funkce main, která tyto části lepí k sobě.

Asi nejdůležitější částí je knihovna TWISO pro komunikace po sběrnici I<sup>2</sup>C prostřednictvím dedikovaného rozhraní procesoru. Knihovnu bylo nutno napsat vlastní, protože se nepovedlo nalézt již existující. Rozhraní TWI ve zvoleném procesoru je totiž trochu ošizené a standardně dostupné knihovny z Atmel AVR311 / Microchip AN2565 [2] tak nelze použít.

Samostatnou částí pak je ovládání podsvitu i snímání optické závory - obě části využívají přerušení procesoru (podsvit přerušeni časovače Timer1, snímání pak přerušeni vyvolané skončením ADC převodu).

Samotný main pak pouze v nekonečné smyčce kontroluje dostupnost dat ze sběrnice a reaguje na ně.

U snímání se uvažovalo o více variantách potlačení vlivu okolí, avšak ukázalo se, že funguje spolehlivě i bez jakékoliv filtrace. Pouze se tedy ve smyčce prochází ADC vstupy a jako aktuální poloha se zvolí ta, pro kterou má ADC nejnižší hodnotu (fototranzistory spínají k zemi, tj. nejvíce nasvícenému fototranzistoru odpovídá nejnižší napětí na pinu procesoru).





- 6 = GND
- 7 = SDA
- 8 = GND
- 9 = SCL
- 10 = GND

Toto zapojení bylo zvoleno s ohledem na možné použití jednoduchého plochého kabelu i kabelu s kroucenými páry. V případě plochého kabelu jsou tak datové vodiče co nejdále od napájení a navíc oddělené zemí (GND). Poloha SCL a SDA byla zvolena s ohledem na standard, který zmiňuje možnost spárovat SDA s napájením, pokud to nejde jinak [4, 7.5 Wiring pattern of the bus lines]. Na základě této zmínky je tedy SDA vodič blíže k napájecím a SCL až na druhém konci konektoru. Při použití krouceného vodiče pak dojde ke spárování hodin (SCL) i dat (SDA) vždy s jednou sousední zemí. Tato volba má však i svá negativa - při použití kroucených párů se sice datové vodiče spárují se zemí, dále však bude jeden pár tvořen čistě zeměmi, jeden čistě +5 V a jeden pak dokonce spáruje +5 V a +12 V. Jedná se však o kompromis vůči celkovému počtu vodičů.

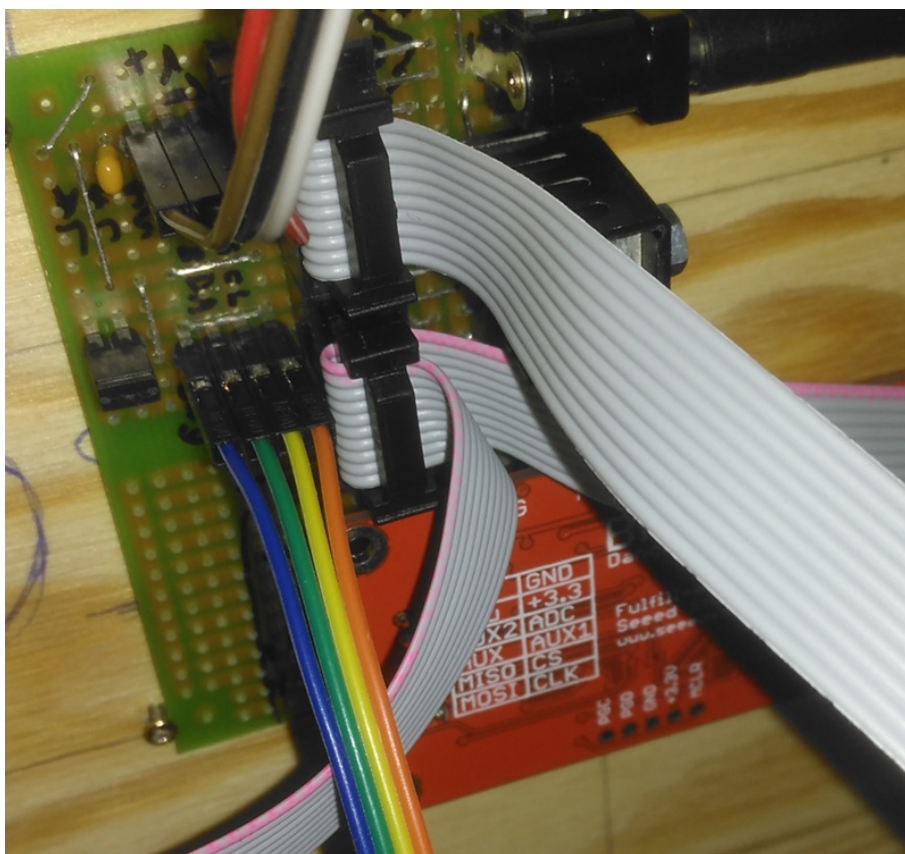
## 3.5 Spojení s PC

Protože se stále jedná o značnou demo verzi, propojení všech prvků zajišťuje jediná I<sup>2</sup>C sběrnice. Jako master zařízení slouží vývojářský nástroj BusPirate v4 [3]. Tento je připojen k počítači přes USB.

Připojení k prvkům pak zajišťuje univerzální deska osazená dvěma 10-pinovými konektory pro rozvod mezi prvky, dvěma 4-pinovými headery pro vyvedení napájení a sběrnice do expanderů (3x PCF8574 + 1x PCF8591) a lineárním 5 V stabilizátorem L7805. Napájení zajišťuje externí 12 V adaptér.

Rozvod mezi prvky (pákami a ukazateli) je 10-žilovým plochým kabelem. Vzhledem ke vzdálenostem mezi panely a pro snadnější manipulaci je však kabel k panelu PHL (obsahujícím ukazatele) již značně dlouhý. Naštěstí nedochází k problémům s přenosem po sběrnici, takže pro účely testování to nevádí. Jediným problémem je výrazný pokles napětí při pohybu serv. Pokud se pohnou všechna v jeden okamžik, napětí poklesne až pod nastavenou úroveň Brown-Out detekce v procesoru a ten se resetuje. Proto byl do volného konektoru doplněn kondenzátor, který tento pokles do značné míry eliminuje. Plně eliminovaný je pak problém prostým doplněním zpoždění do řídicího programu, díky čemuž se serva rozjedou s mírným časovým rozestupem a k výpadkům nedochází.

Pokud by serva byla napojena dle celkového plánu do lokálního uzlu v panelu, výpadky by měly být eliminovány. DPS navíc umožňuje přepojit napájení serva z +5 V na V+ (pin 1) a tak ho oddělit od napájení procesoru.



Obrázek 3.10: Univerzální deska rozvodu

## Kapitola 4

### Software

Softwarová část byla rozdělena na několik samostatných částí popsaných níže.

#### 4.1 ModuCab

Softwarový framework, který tvoří spojení mezi hardwarem a modelem.

Je postaven na myšlence práce s neznámými bajty, jejichž obsah zná až konec řetězce (model, či vstupní/výstupní zařízení). Jeho jádro zajišťuje předání dat z modelu do zařízení a stejně tak opačně.

Dále obsahuje množství rozhraní (I<sup>2</sup>C, sériový port), jejich ovladačů (BusPirate I<sup>2</sup>C, Posix serial) a dílů k nim připojených (páka, ukazatel, expander).

Díky této struktuře je případně možné tyto programy za sebe řetězit (např. zobrazení na displeji přes síť může zajišťovat podřízená instance, která předává data mezi displejem, příp. tlačítky, a hlavní instancí běžící u modelu. Zároveň je možné do tohoto řetězce vložit „override“ blok, který pak umožní běh modelu či hardware zvlášť pro testování. Takovýto blok je ve zdrojových kódech i rozpracován, avšak kvůli času nebyl dokončen.

Tato myšlenka má však i poměrně stinnou stránku v podobě mnoha explicitních přetypování v kódu, která tak mohou velmi snadno skrýt chybu. Během vývoje se nicméně projevovala spíše pozitiva v podobě univerzálnosti a modulárnosti tohoto řešení.

#### 4.2 Model - Loco363

Velmi jednoduchý model zajišťující celou simulaci. V současnosti obsahuje velmi jednoduchou logiku řízení (hlavně Centrální Řídicí Člen) a velmi zjednodušenou dynamiku.

Na základě požadavku poměrného tahu se z maximální tažné síly vypočte poměrná část, odečte se od ní složka tíhové síly působící ve směru či proti směru pohybu (dle zadaného sklonu) a tato výsledná síla se dosadí do vztahu:

$$\Delta v = \frac{F}{M} \Delta t \quad ,$$

kde  $M$  je celková hmotnost vlaku (lokomotiva + zadaný náklad).

### 4.3 Zpracování výstupů

Z časových důvodů již nebyla upravena část pro poslání výstupů do kolejistě (odzkoušená v inividuálním projektu). Aktuální stav se tedy pouze vypisuje na standardní výstup modelu.

### 4.4 Spouštění

Z časových důvodů již nedošlo na implementaci jednoduchého spouštěcího programu. Pro spuštění je však možné použít z MC test „main\_shmem“, který vytvoří a inicializuje potřebnou sdílenou paměť. Po jeho spuštění pak je možné v druhém terminálu spustit model (z GIT větve demo) s parametry:

```
<main> \  
'Loco-363_Modu-Cab_test_UP' \  
'Loco-363_Modu-Cab_test_DOWN' \  
<sklon v promile [+/-50]> \  
<system [AC/DC]> \  
<hmotnost nákladu v tunách [>0]>
```

## Kapitola 5

### Modelová železnice

Způsoby řízení modelové železnice se mohou lišit podle měřítka, ve kterém jsou jednotlivá vozidla zpracována. Níže popisované varianty jsou patrně nejčastější ve všech měřítkách - v každém případě však platí pro měřítko TT (1:120), které je pro tuto práci použito.

Přehled běžně používaných měřítek je v tabulce 5.1. Vychází ze standardů *NMRA S-1.2 - General Standard Scales*[7] a *NEM 010 - Maßstäbe, Nenngrößen, Spurweiten*[6], nicméně jen částečně, protože každá z norem definuje měřítko trochu odlišně.

Měřítka	Poměr
G	1:22,5
0	1:45
H0	1:87
TT	1:120
N	1:160
Z	1:220

**Tabulka 5.1:** Přehled modelových měřítek

Z přehledu je zřejmé, že jiné možnosti jsou ve velikosti zahradní železnice (G, 0) a jiné právě v TT. V TT typicky lokomotivy kromě pojezdu obsahují jen osvětlení. Ovládání sběračů či spřáhel se prakticky nevidí, protože do stísněného prostoru lze jen těžko dostat potřebné komponenty.

I proto pro test použité lokomotivy využívají z vytvořeného modelu jen informace o rychlosti a osvětlení.

Základní dva používané způsoby řízení jsou analogový a digitální s přenosem řídicí informace po kolejkách.

Jsou sice např. i analogové systémy, kde obě „pojezdové“ kolejnice tvoří jeden pól a pro druhý se používá třetí kolejnice uprostřed, nebo systémy s druhým pólem tvořeným trolejemi, nicméně tyto nejsou tak časté. Podobně existují systémy s bezdrátovým přenosem řídicí informace.

## 5.1 Analogové ovládání

V analogovém systému je použito přímého řízení motoru lokomotivy napětím v kolejkách. Podle standardu NMRA S-9 - Electrical <sup>1</sup> je pro maximální rychlost používáno napětí alespoň 12V, kdy kladný pól je na pravé kolejnici ve směru jízdy. Pro velikosti H0 a menší se pak běžně používá rozsah 0-12V.

V lokomotivě se pak nachází jen motor s odrušovacím kondenzátorem a tlumivkami pro připojení ke kolejkám (viz. Schéma 1). Právě díky tlumivkám je pak možné do kolejí pustit ještě vysokofrekvenční signál (např. pro napájení osvětlení vozů nezávisle na trakčním napájení), aniž by tento měl vliv na motor (který by se jinak zbytečně zahříval, protože by se na něm jen mařil výkon). Více v 5.1.4 Ovládání přídatných funkcí.

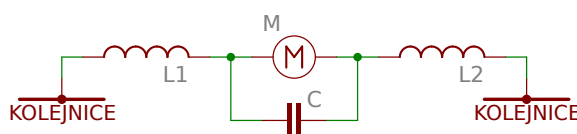


Schéma 1: Zapojení motoru v lokomotivě

### 5.1.1 Lineární řízení

Nejjednodušším způsobem je lineární řízení, kdy se napětí do kolejí reguluje např. potenciometrem, případně posíleným o výstupní výkonnový prvek. Tento způsob řízení používá např. klasický ovládací transformátor PIKO FZ1 (Figure 5.1), jehož známé zapojení (Schéma 2) obsahuje kromě síťového transformátoru (s regulací pomocí změny počtu závitů na sekundárním vinutí) jen usměrňovač, přepínač směru a bimetalovou ochranu pro odpojení napájení při zkratu.

Transformátor FZ1 je kombinovaný - regulovaná větev 0-12 V = je pro pohon lokomotiv (F = Fahrtransformator), druhá 16 V ~ je pro napájení příslušenství (Z = Zuberhör) jako přestavníky elektromagnetických výhybek či modelů mechanických návěstidel.

### 5.1.2 Pulzně šířková modulace

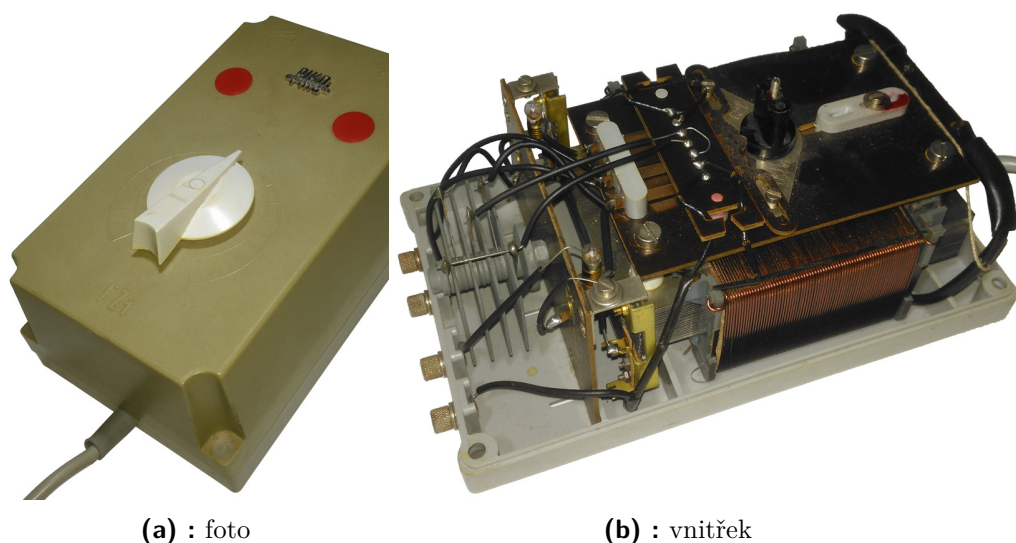
Pokročilejší metodou je řízení motorů lokomotiv pomocí PWM modulace. Díky ní pak lze využít známých výhod, především pak výrazně vyššího momentu motoru při nízké rychlosti oproti lineárnímu řízení napětím.

Konstrukcí se dá najít bezpočet, za všechny např. konstrukce používaná panem Wimmerem ze Žďáru nad Sázavou, dostupná na jeho stránkách [www.kolejiste-zdar.cz](http://www.kolejiste-zdar.cz) <sup>2</sup> (Schéma 3).

Tato konstrukce je velmi jednoduchá a využívá čistě diskretních součástek. Samozřejmě by bylo možné využít pro generování PWM signálu časovače 555

<sup>1</sup>[https://www.nmra.org/sites/default/files/standards/sandrp/pdf/s-9\\_1984.08.pdf](https://www.nmra.org/sites/default/files/standards/sandrp/pdf/s-9_1984.08.pdf)

<sup>2</sup><http://www.kolejiste-zdar.cz/web/postupy/regulator/regulator.html>



(a) : foto

(b) : vnitřek

**Obrázek 5.1:** Ovládací transformátor PIKO FZ1

a nebo ho rovnou generovat pomocí procesoru. Odtud však již není daleko k adresaci jednotlivých lokomotiv a jejich nezávislému řízení. Pak už se však nejedná o ovládání analogové, nýbrž digitální.

### ■ 5.1.3 Více lokomotiv, úseky, detekce obsazení

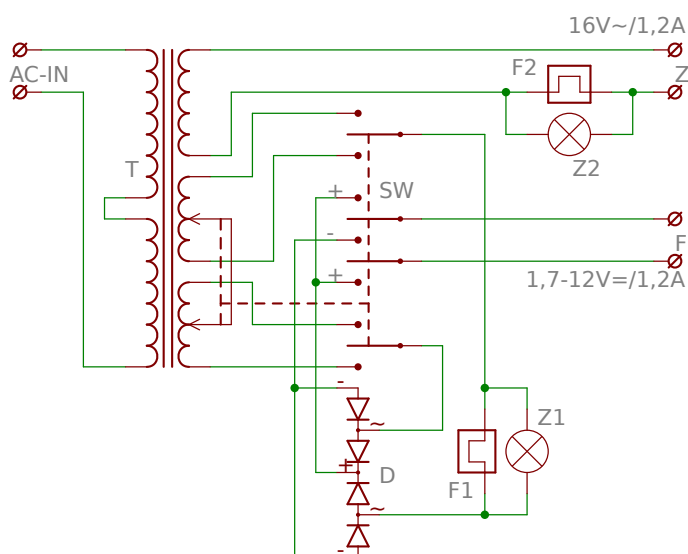
Pokud chceme v analogovém systému provozovat více lokomotiv nezávisle, je třeba rozdělit koleje na úseky, které pak lze nezávisle připojovat k (různým) regulátorům.

Pro detekci obsazení se v analogu většinou používá magnetů na vozidlech a jazýčkových kontaktů v kolejišti. Zřídka se používá taktéž snímání odběru proudu v úseku jako u digitálního řízení, avšak toto musí být zajištěno buď trvalým napájením úseků malým proudem, který vozidla v něm neovlivní, nebo musí být řešeno obdobně jako přídatné funkce, viz. níže.

### ■ 5.1.4 Ovládání přídatných funkcí

Přídatné funkce lokomotiv a vagonů lze při analogovém řízení ovládat jen těžko. Asi jediným používaným způsobem je přidání vysokofrekvenčního signálu (např. 20 kHz), kterým se napájí osvětlení vagonů či celého vlaku včetně lokomotivy nezávisle na trakčním napájení. Samozřejmě tímto způsobem nelze rozsvítit každý vagon zvlášť, či snad jen jeho část. Tento signál je pak rovněž nutno ovládat spolu s trakčním napájením, aby se dostal jen do úseků, ve kterých je souprava, jejíž svícení tímto zajišťujeme.

Aby toto fungovalo, je nutné správně oddělit zdroj VF signálu a trakci. Mezi každý trakční regulátor a spoj s VF generátorem je tedy třeba přidat správně napočítanou tlumivku (nejlépe na oba póly), taktéž ve hnacích vozidlech musí být umístěny tlumivky mezi sběrače proudu a motor. U hnacích vozidel se nicméně jedná o součást standardního vybavení pro analogo-



**Schéma 2:** Zapojení ovládacího transformátoru PIKO FZ1

vu trakci. Na straně VF je pak třeba odfiltrovat trakční napájení pomocí správně napočítaného kondenzátoru, zapojeného v sérii na vývodech generátoru i na přívodech k osvětlení uvnitř vozidel. Samozřejmě je pak nutné ve vozidlech ještě VF signál usměrnit a vyhladit kondenzátory před přivedením k samotným LED osvětlení.

Ovládání spřáhel či nějakých servopohonů, umístěných přímo ve vozidlech, pak jednoduše realizovat patrně nelze. V menších velikostech (jako např. v TT) to nicméně stejně moc nevádí, protože do stísněných prostorů, daných modelovým měřítkem, se málokdy vejde něco více než osvětlení.

### 5.1.5 Příslušenství

V zásadě je možné pro ovládání přestavníků výhybek, návěstidel a dalšího příslušenství použít jakýkoliv způsob. Většinou se nicméně k analogově řízenému kolejišti používá čistě systém vyvedení drátů od každého prvku až na ovládací pult k jednotlivým spínačům.

Někdy se pro řízení kolejiště používá reléového zabezpečení po vzoru „velké“ železnice (viz. kolejiště pana Wimmera <sup>3</sup>), někdy též mikroprocesorů implementujících zabezpečení v softwaru (např. moduly Zhlavík pana Báni <sup>4</sup>). Samotný přenos povelů k prvkům v kolejišti je však obvykle i tak realizován vodiči od každého prvku, sběrnice se zde povětšinou nevyskytují.

Trochu výjimkou jsou zde návěstidla, ke kterým právě pan Báňa vymyslel jednoduchou sběrnici S-com[10] a dekodéry <sup>5</sup> ke každému návěstidlu, umožňující ovládat jakékoliv návěstidlo včetně předvěsti a signalizace na ovládacím panelu pomocí 3 drátů. Tato sběrnice je však mnohem častěji používána na digitálně řízených kolejištích.

<sup>3</sup><http://www.kolejiste-zdar.cz/>

<sup>4</sup><https://www.mtb-model.com/elektro/s-com-zhl2.htm>

<sup>5</sup><https://www.mtb-model.com/elektro/s-com-nav.htm>



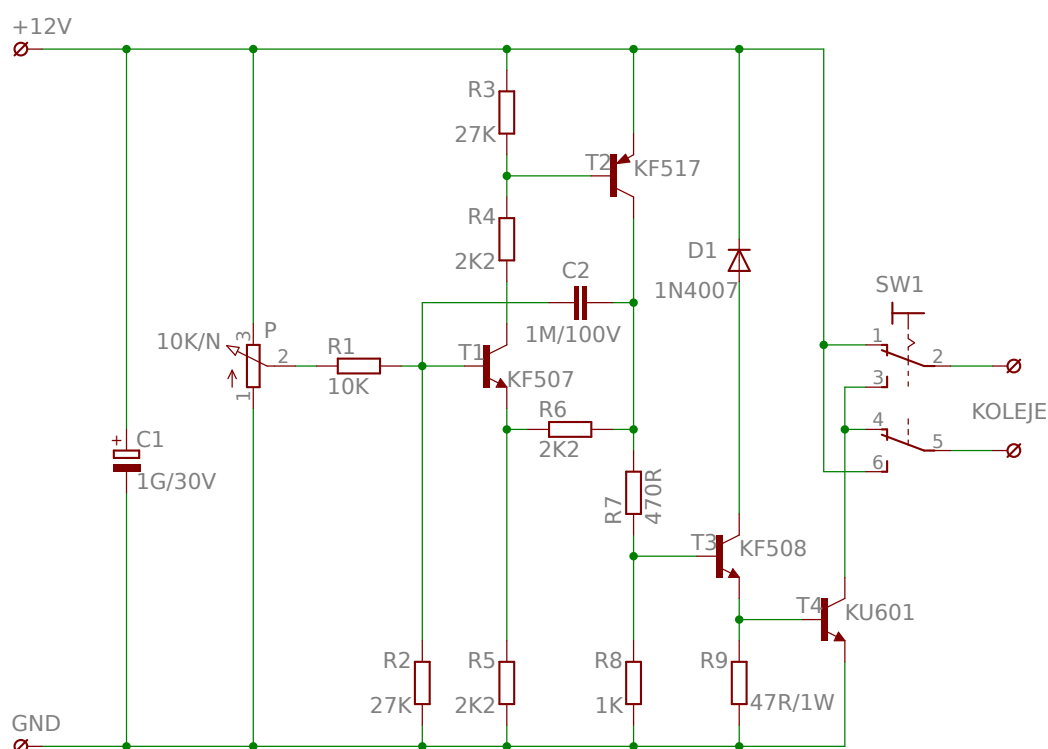


Schéma 3: Zapojení PWM regulátoru od p. Wimmera

## 5.2 Digitální řízení

Digitální řízení je založené na předávání řídicích povelů z centrály do každé lokomotivy. Koleje jsou trvale napájeny střídavým napětím a řídicí povely jsou do něj namodulované. Každá lokomotiva je pak vybavena vlastním dekodérem, který informace přijímá, a na jejich základě ovládá motor i přídatné funkce (např. osvětlení). Protože součástí povelu je vždy adresa dotyčné lokomotivy (dekodéru), lze tak nezávisle na sobě řídit lokomotivy, i když stojí na stejné koleji těsně u sebe. V podstatě tedy není nutné dělit kolejiště do úseků, nicméně toto dělení se stejně obvykle provádí pro detekci obsazení (viz. 5.2.2 Detekce obsazení, úseky).

Pro „digitál“ existuje několik systémů, nicméně nejpoužívanějším je patrně DCC (Digital Command Control). Tento systém řízení byl vyvinut firmou Lenz Elektronik GmbH jako Digital plus System[5] a následně převzat do standardů NMRA S-9.1 DCC Electrical Standard[8], NMRA S-9.2 DCC Communications Standard[9] a dalších.

### 5.2.1 Příslušenství

Protože je z principu ovládání příslušenství (výhybky, návěstidla, apod.) od řízení jízdy oddělené, není jejich ovládání přes DCC nutností. Často se používá kombinace digitálního řízení jízdy (+ osvětlení vozů, apod.) s analogovým ovládáním výhybek a návěstidel. Standard DCC nicméně umožňuje

příslušenství ovládat stejnou sběrnici, což pro menší kolejiště bohatě dostačuje, a umožňuje to jednoduše zapojit do řízení provozu počítač. Zpětná vazba pro detekci obsazení úseků a správného přestavení výhybek však již součástí není, je nutné ji řešit odděleně (viz. 5.2.2 Detekce obsazení, úseky).

### ■ 5.2.2 Detekce obsazení, úseky

V digitálním řízení není třeba (až na vratné smyčky) dělit koleje do úseků. Většinou se však nad digitálně řízeným kolejištěm začne dříve či později experimentovat s řízením pomocí počítače, který zpětnou odezvu vyžaduje. K tomu se pak s výhodou využívá faktu, že koleje jsou napájené trvale a každý dekodér ve vozidle má alespoň minimální spotřebu danou během procesoru. Pro vozidla bez dekodérů se pak využívá přídavných odporů mezi koly (vyžaduje pak sběrače proudu stejně jako vozidlo s dekodérem) či natírání dvojkolí odporovým lakem. Vzhledem k jednoduchosti a i nízké ceně proudových čidel (obvykle jde o dvě diody či diodový můstek doplněný optočlenem a odporem) se jen málokdy používá jiný způsob.

## Kapitola 6

### Závěr

Z celého projektu se povedlo z velké části dokončit SW ModuCab, který univerzálním a modulárním způsobem zajišťuje komunikaci mezi HW a samotným modelem.

Samotný model je však pouze velmi jednoduchý, jeho rozšíření však díky odložení HW části do ModuCab-u nemusí řešit téměř nic jiného, než simulaci samotnou. Samotné parametry simulace (celkovou váhu vlaku, sklon tratě či napájecí systém) lze aktuálně zadat pouze jako parametry při startu programu. Žádná z hodnot však není natvrdo nastavená v kódu a možnost měnit parametry za běhu simulace je tak jen otázkou dostatku času na doplnění kódu.

Fyzický pult byl realizován ve velmi omezené verzi, nicméně pro ukázkou fungující komunikace oběma směry dostačuje. Jeho rozšíření by nemělo být velkým problémem, jak ostatně ukazuje i využití tlačítek v demu namísto rotačních spínačů.

Simulace v reálném čase není v současné implementaci zcela možná. Model příliš spoléhá na nic negarantující systémové volání sleep (resp. usleep), stejně tak předávání výstupu každého kroku přes standardní výstup opět zatěžuje systém a čeká na jeho odezvu. Využití sdílené paměti na všech vstupech a výstupech by tento nedostatek mohlo zmírnit.

Ovládání modelové železnice však již nebylo dotažené do konce. V příložených zdrojových kódech je nicméně demo z individuálního projektu, kdy byla prakticky ověřena možnost předávání dat do modelové železnice přes protokol SRCP a software RocRail. Pro použití s aktuálním kódem by stačilo de-facto upravit parser čtoucí ze standardního vstupu na jiný formát dat.

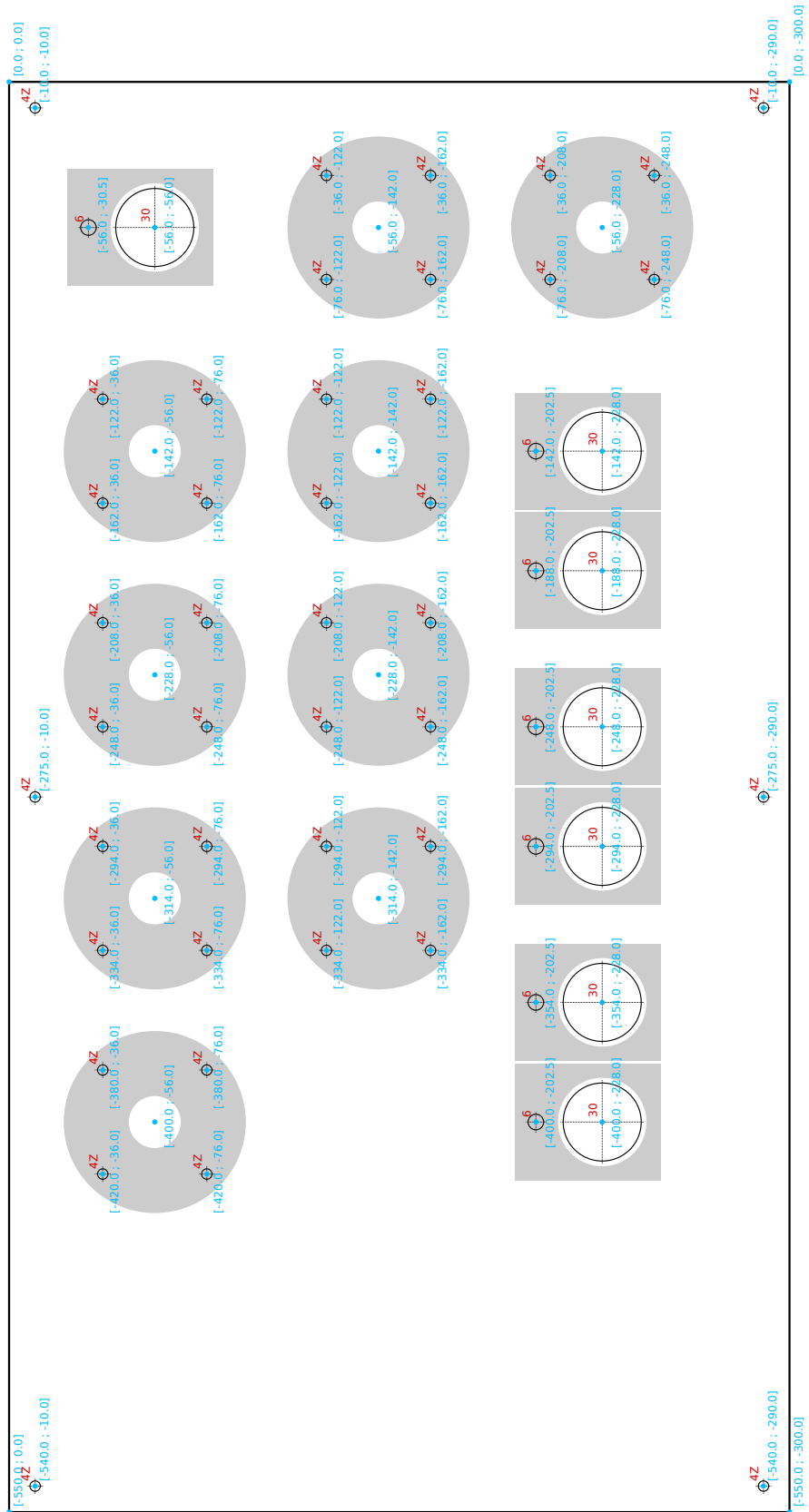




## Příloha A

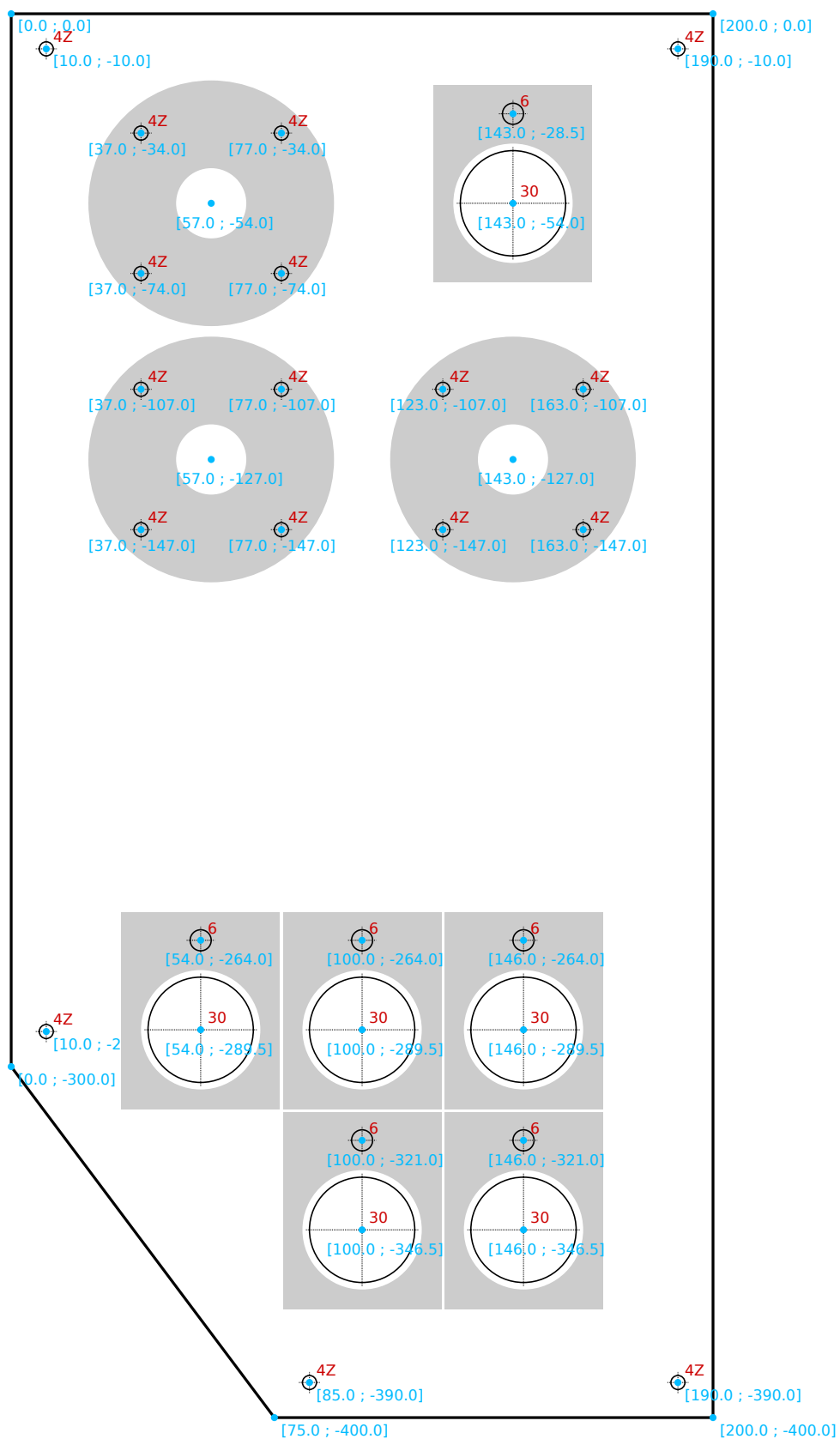
### Panely

Výkres pro panel PHL je možné najít v elektronické podobě na přiloženém CD. Z důvodu velikosti se nevejde na jednu stránku a vektorový formát neumožňuje snadné rozdělení na dvě části.



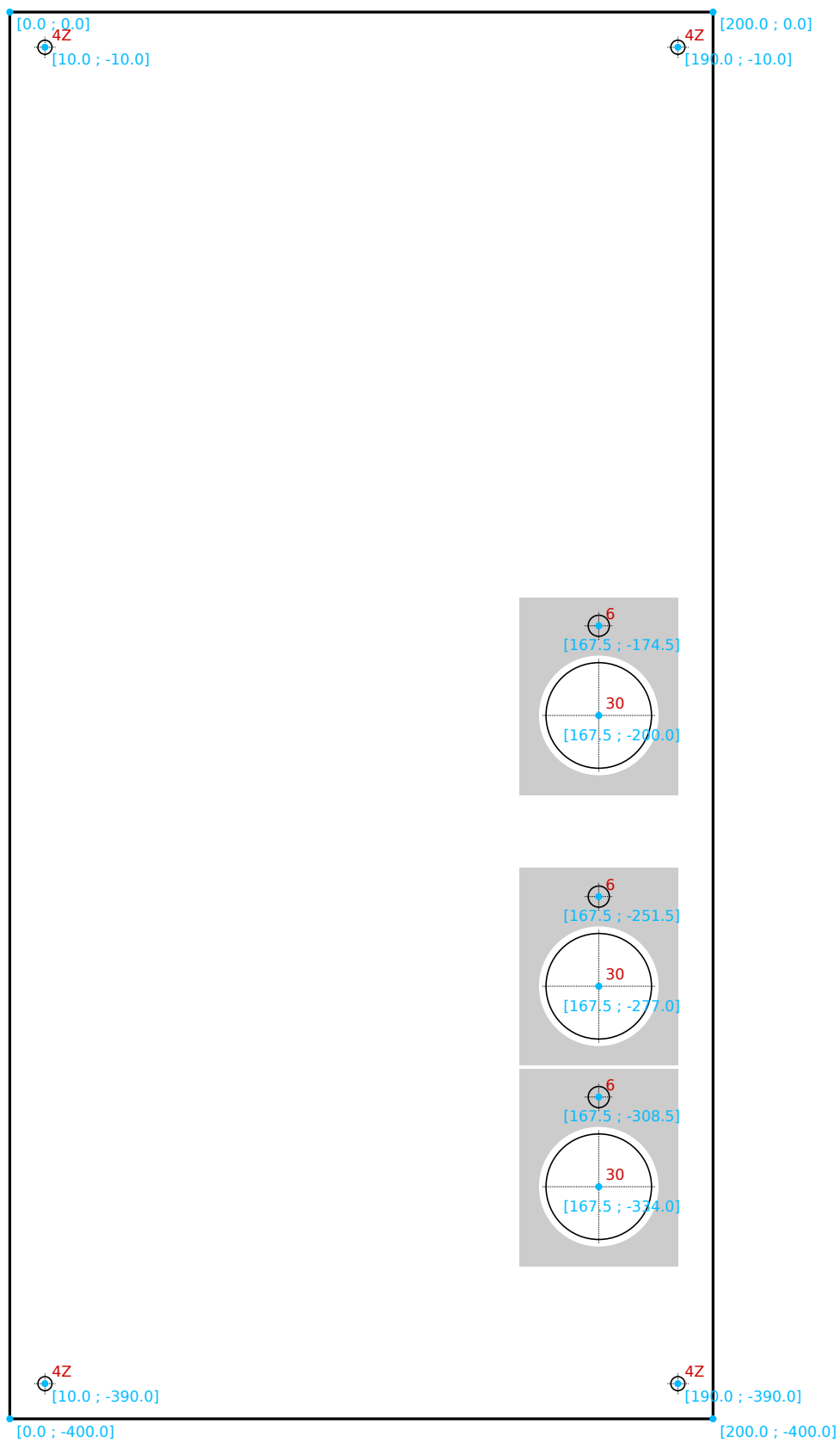
Obrázek A.1: Mechanický výkres panelu PDL





Obrázek A.3: Mechanický výkres panelu PDP





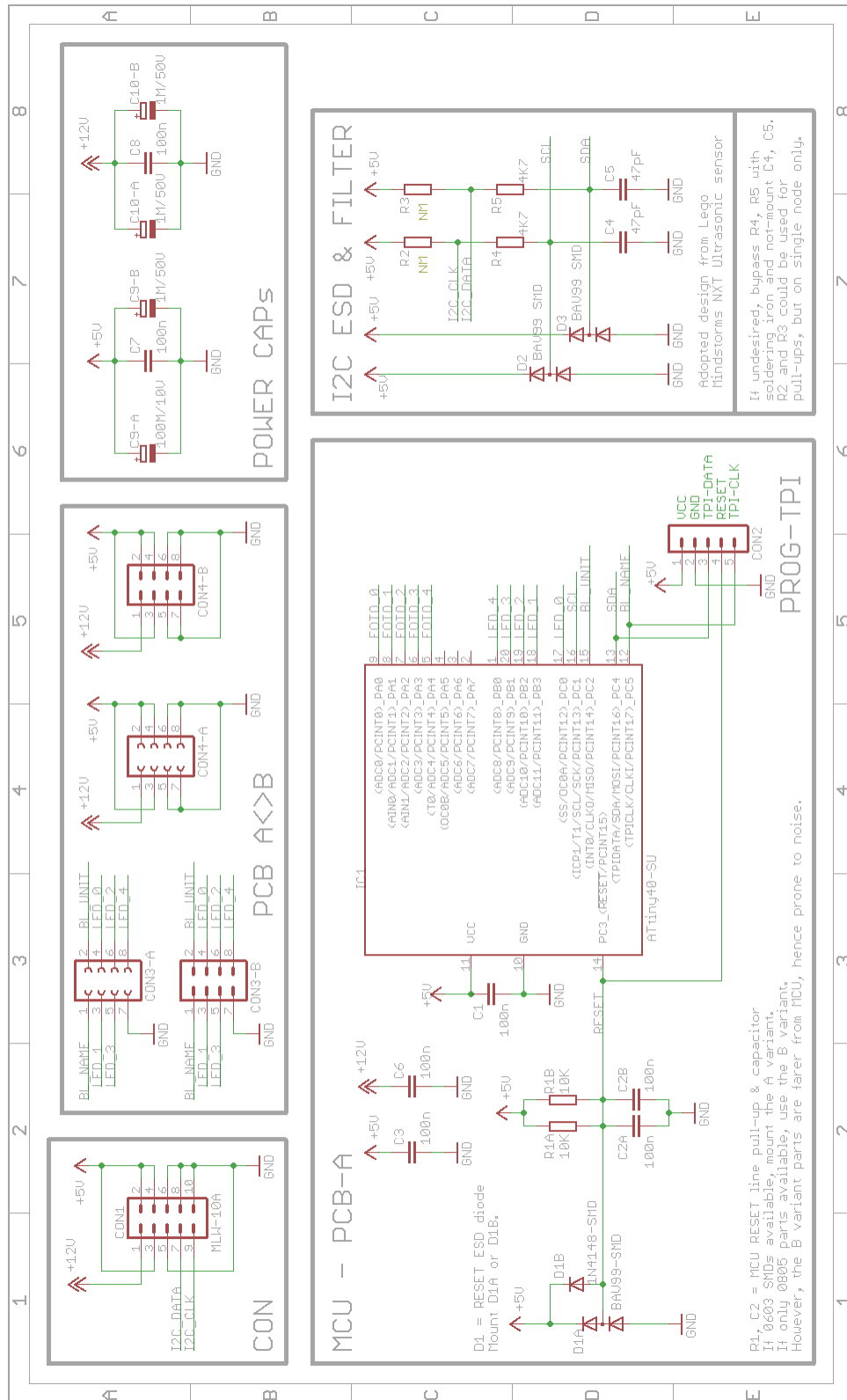
Obrázek A.4: Mechanický výkres panelu PDB



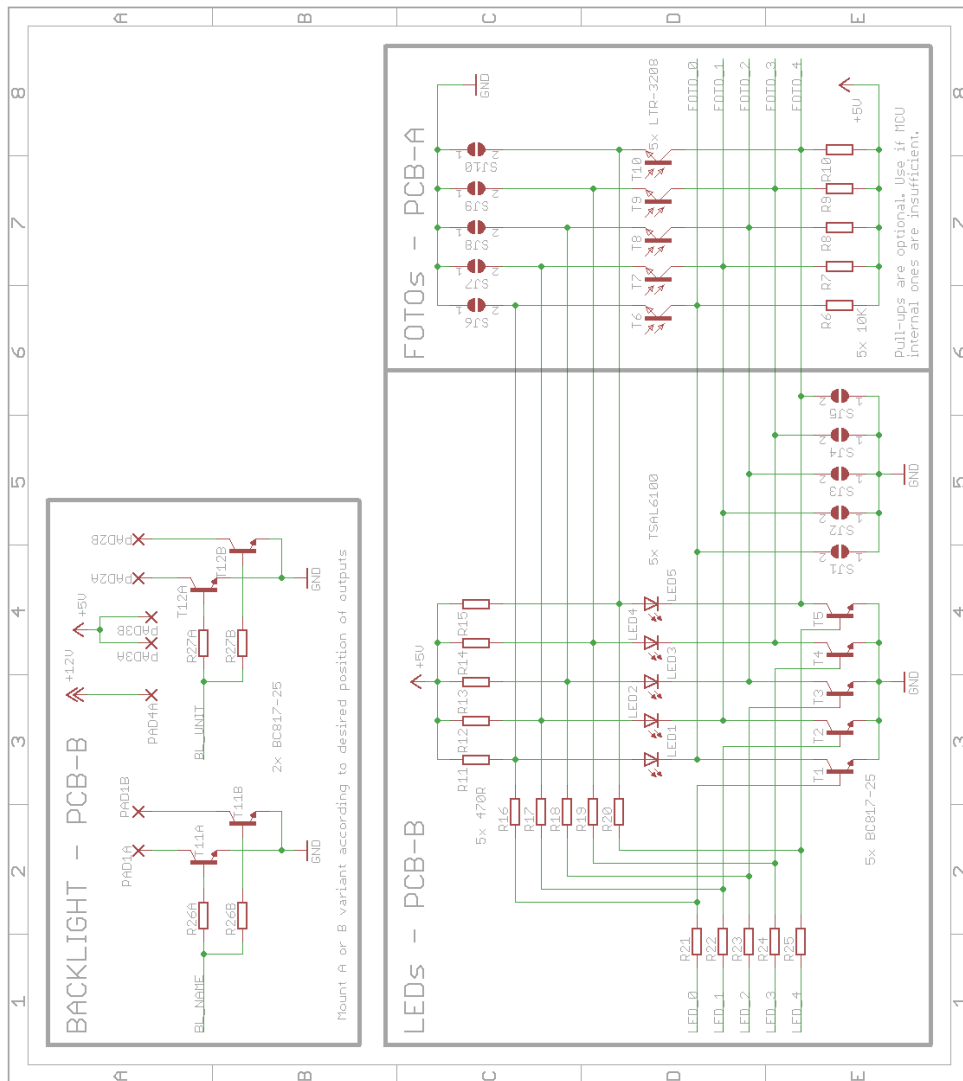


## **Příloha B**

**Páka**



Obrázek B.1: Schéma páky - 1. strana



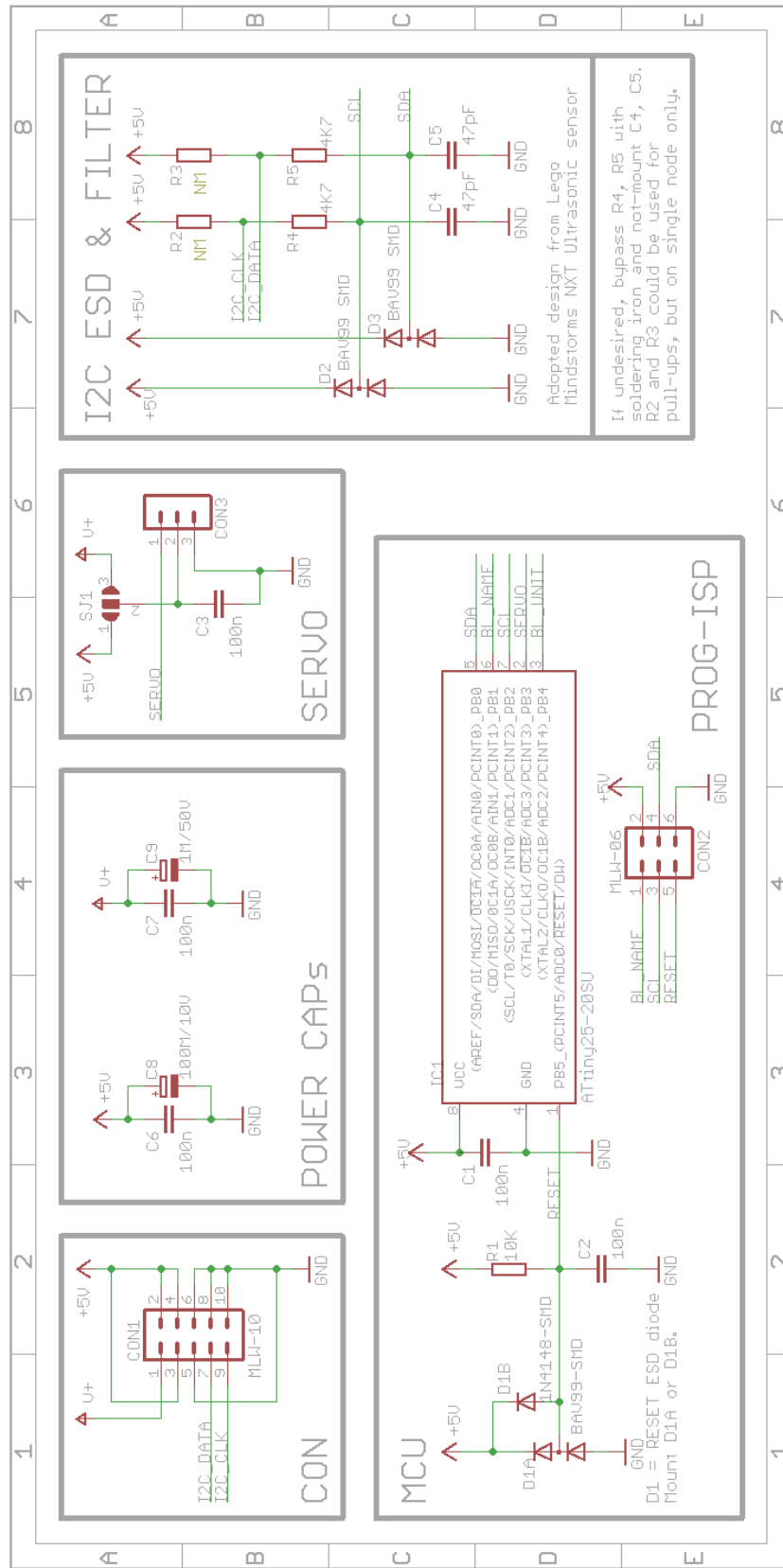
Obrázek B.2: Schéma páky - 2. strana





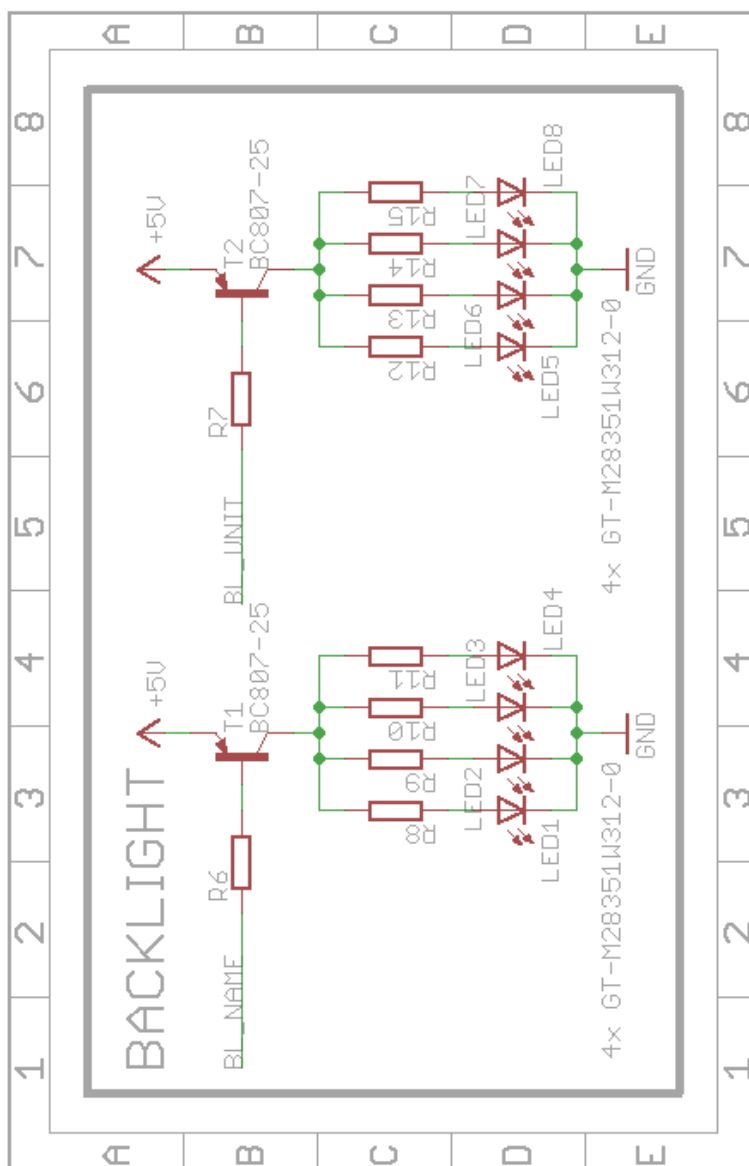
## **Příloha C**

### **Terčový ukazatel**



Obrázek C.1: Schéma ukazatele - 1. strana





Obrázek C.2: Schéma ukazatele - 2. strana



## Příloha D

### Literatura

- [1] David Švestka, AtlasLokomotiv.net, *Lokomotivní řady 363 (ES499.1), 362*. <<http://www.atlaslokomotiv.net/loko-363.html>>, (25. 5. 2018)
- [2] Atmel, *AVR311: Using the TWI Module as I2C Slave*. <[http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/atmel-2565-using-the-twi-module-as-i2c-slave\\_applicationnote\\_avr311.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/atmel-2565-using-the-twi-module-as-i2c-slave_applicationnote_avr311.pdf)>, (25. 5. 2018)
- [3] Dangerous Prototypes, *Bus Pirate v4 design overview* <[http://dangerousprototypes.com/docs/Bus\\_Pirate\\_v4\\_design\\_overview](http://dangerousprototypes.com/docs/Bus_Pirate_v4_design_overview)>, (25. 5. 2018)
- [4] NXP, *UM10204 - I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual (Rev. 6 — 4 April 2014)*. <<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>>, (25. 5. 2018)
- [5] Lenz Elektronik GmbH, *Digital plus System*. <<http://www.lenz-elektronik.de/digitalplus-system.php>>, (25. 5. 2018)
- [6] NMRA, *NEM 010 - Maßstäbe, Nenngrößen, Spurweiten*. <[http://www.morop.org/downloads/nem/de/nem010\\_d.pdf](http://www.morop.org/downloads/nem/de/nem010_d.pdf)>, (25. 5. 2018)
- [7] NMRA, *S-1.2 - General Standard Scales*. <<https://www.nmra.org/sites/default/files/standards/sandrp/pdf/S-1.2%202009.07.pdf>>, (25. 5. 2018)
- [8] NMRA, *S-9.1 DCC Electrical Standard*. <[https://www.nmra.org/sites/default/files/standards/sandrp/pdf/s-9.1\\_electrical\\_standards\\_2006.pdf](https://www.nmra.org/sites/default/files/standards/sandrp/pdf/s-9.1_electrical_standards_2006.pdf)>, (25. 5. 2018)
- [9] NMRA, *S-9.2 DCC Communications Standard*. <<https://www.nmra.org/sites/default/files/s-92-2004-07.pdf>>, (25. 5. 2018)
- [10] Vítězslav Báňa, *Digitální signalizace návěstidel S-com*. <<https://www.mtb-model.com/elektro/s-com.htm>>, (25. 5. 2018)