

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grossmann** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434835**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Elektrický longboard**

Název bakalářské práce anglicky:

**Electric longboard**

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretický rozbor, výpočet parametrů součástí (dimenzování motoru a baterie)
2. Kompletní návrh konstrukce v softwaru Autodesk Inventor
3. Realizace mechanické části
4. Realizace elektrické části

Seznam doporučené literatury:

1. Pavelka, J.: Elektrické pohony. Praha: ČVUT. 2006
2. Voženílek, P, Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče. Praha: ČVUT. 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Kočárník Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **27.05.2018**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

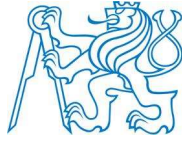
Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Student:** Jan Grossmann  
**Obor:** Elektrotechnika a management  
**Název Tématu:** Elektrický longboard

**Vedoucí bakalářské práce:**

**Ing. Petr Kočárník, Ph.D.**

## **Prohlášení autora práce**

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 autora práce

## **Poděkování:**

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Petru Kočárníkovi, Ph.D za spoustu hodin práce věnovaných mému projektu, za poskytnutí prostředků a prostor pro práci a za nasměrování k cíli, když jsem sám nemohl najít řešení. Za čas a rady patří mé dík také panu Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat bratranci Radku Brhlovi a panu Ing. Robertu Šomanovi za výrobu a úpravu dílů. Děkuju také rodině za podporu a přítelkyni Káji za projasnění náročných dnů.



## **Absrakt**

Práce se věnuje návrhu a výrobě pohonu elektrického longboardu a ekonomické analýze projektu. Návrh a realizace je rozdělena do dvou částí – návrh a realizace mechanické a elektrické části. Hlavním bodem práce je návrh elektroniky, řízení a ovládání elektrického longboardu. V závěrečné části se věnuju ekonomickému zhodnocení projektu a možnosti podnikání na dnes ještě nenasyceném trhu s elektrickými longboardy.

## **Abstract**

My thesis on the topic Electric longboard undertakes the whole process of manufacturing a working electrical longboard and an economical analysis of the project, as well as an assessment of starting a bussiness with electirical longboards. The thesis is divided into two main parts - design and realization of the mechanical and the electronical part.

## **Klíčová slova**

elektrický longboard, řízení BLDC, bezkartáčový motor, startup, ESC, Arduino, dálkové ovládání

## **Key words**

electric longboard, BLDC control, brushless motor, startup, ESC, Arduino, remote control

## Obsah

1. Úvod .....	1
1. Struktura longboardu a elektrického longboardu .....	1
1.1 Držák motoru.....	2
1.2 Řemenice .....	3
1.3 Motor.....	3
1.4 Řídicí jednotka ESC (electronic speed controller) .....	3
1.5 Akumulátor.....	3
1.6 Ovladač.....	3
2. Dimenzování dílů .....	4
2.1 Výpočet síly pro rozjezd.....	4
2.1.1 Vztahy .....	4
2.1.2 Valivý odpor:.....	5
2.1.3 Síla pro zrychlení:.....	5
2.2 Výpočet síly pro jízdu po rovině .....	6
2.3 Výpočet síly pro jízdu do kopce při rychlosti $v = 5 \text{ m.s}^{-1}$ .....	7
2.4 Výpočet momentu .....	8
2.4.1 Jízda po rovině.....	8
2.4.2 Jízda do kopce .....	8
2.5 Výpočet řemenice.....	9
2.6 Otáčky .....	9
2.6.1 Úhlová rychlost kola při rozjezdu .....	9
2.7 Výpočet výkonu .....	10
2.7.1 Rozjezd.....	10
2.7.2 Jízda po rovině.....	10
2.7.3 Jízda do kopce .....	10
2.8 Akumulátor.....	11
2.8.1 Jízdí profil.....	11
2.8.2 Rozjezd.....	11
2.8.3 Ostatní části trasy .....	12
3. Výběr součástí .....	12
3.1 Řemenice a řemen .....	12
3.2 Motor.....	12
3.3 Akumulátor.....	13
4. Návrh v Autodesk Inventoru .....	14
4.1 Inspirace .....	14

4.2	Deska longboardu, kola a trucky .....	14
4.3	Držák motoru.....	14
4.4	Řemenice .....	16
4.4.1	Hnací řemenice.....	17
4.4.2	Hnaná řemenice .....	17
4.5	Ovladač.....	19
4.6	Řemen.....	19
5.	Realizace mechanické části .....	21
6.	Elektrický pohon .....	22
6.1	Bezkartáčový stejnosměrný motor .....	22
6.1.1	Konstrukce.....	22
6.2	Řídící jednota ESC .....	23
6.3	Pulzně šířková modulace.....	23
6.4	Způsoby spínání střídače.....	24
6.4.1	Nezávislé spínání.....	24
6.4.2	Komplementární spínání .....	24
6.5	Řízení.....	25
6.5.1	Hallový senzory.....	25
6.5.2	Detekce polohy Hallovými senzory .....	26
6.5.3	Kalibrace Hallových senzorů .....	26
6.5.4	Komutační vektory .....	27
7.	Návrh a realizace elektroniky .....	29
7.1	Třífázový H most – tranzistory.....	30
7.2	Budič bootstrap.....	31
7.3	XNOR gate .....	32
7.4	Schmittův klopný obvod a RC filtr .....	32
7.5	Regulátory napětí .....	33
7.6	Měření proudu .....	33
7.7	Přijímací a vysílací modul .....	33
8.	Software.....	34
8.1	Komutace.....	34
8.2	Nastavení PWM .....	34
8.2.1	Fast PWM.....	35
8.2.2	Phase correct PWM.....	35
8.3	Vstup z Hallových senzorů.....	36
8.4	Měření proudu .....	36
8.5	Měření napětí.....	36

8.6	Měření otáček.....	37
8.7	Bezdrátová komunikace .....	37
8.7.1	Funkce vysílání – writeByte() .....	37
8.7.2	Funkce příjem – readByte().....	37
8.7.3	Ovládání .....	38
8.7.4	PWM Rampa .....	39
9.	Realizace .....	40
9.1	Průběhy.....	41
10.	Návrh desky plošného spoje.....	44
10.1	Chladič.....	44
11.	Ekonomická analýza.....	46
11.1	Finanční náklady .....	46
11.1.1	Longboard .....	46
11.1.2	Mechanická část pohonu .....	46
11.1.3	Elektronická část pohonu .....	46
11.1.4	Fixní náklady.....	48
11.1.5	Variabilní náklady .....	48
11.1.6	Cena výrobku .....	48
11.1.7	Časová náročnost.....	48
11.1.8	Opportunity cost.....	49
11.1.9	Náklady na legislativu a reklamu .....	49
11.2	Rozvaha, výsledovka a cash flow.....	50
12.	Závěr.....	53
13.	Bibliografie.....	54

## Seznam příloh

1. Výkres\_svorka
2. Výkres\_krátký držák
3. Výkres\_dlouhý držák
4. Svorka\_úprava\_(krátký držák)
5. Svorka\_úprava\_(dlouhý držák)
6. Schéma
7. PCB\_rozmístění součástek\_horní strana\_vodivá vrstva
8. PCB\_rozmístění součástek\_horní strana
9. PCB\_rozmístění součástek\_dolní strana
10. PCB\_rozmístění součástek\_dolní strana\_vodivá vrstva
11. Program ESC
12. Program ovladač



## 1. Úvod

Elektrické stroje našli uplatnění téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Rozsah využití točivých elektrických strojů je velmi široký – velké stroje o výkonu několika megawattů, využívané například jako generátory v elektrárnách až po maličké stroje o výkonu miliwattů v hodinkách. V dnešní době se využití elektrických pohonů výrazně rozšiřuje do osobní automobilové dopravy. Ruku v ruce s vývojem a větší dostupností pohonů a baterií se na trhu začali objevovat elektricky poháněné malé dopravní prostředky. Prvními zástupci byly dnes již notorické známé vozítka Segway [1]. Následovala elektricky poháněná kola a před několika lety se vznikl nový trh s elektrickými longboardy.

Známejší příbuzný longboardu je skateboard. V principu jsou naprosto totožné – jednoduše řečeno jsou to desky na kolečkách. Oproti skateboardu je longboard větší, kolečka mají větší průměr a více se využívá jako dopravní prostředek. A chcete-li využívat zábavný a ekologický dopravní prostředek, přitom nevykonávat žádnou námahu, je elektrický longboard nenahraditelný. Taková myšlenka dala vzniku trhu s elektrickými longboardy.

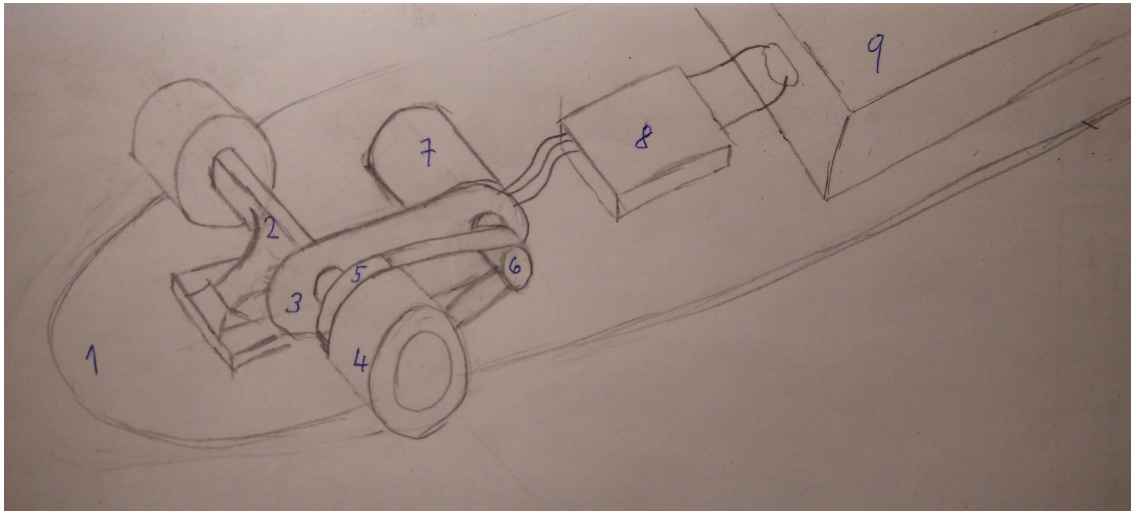
Dnes je na trhu přibližně dvacet hlavních výrobců kvalitních elektrických longboardů. Kromě těchto výrobců je na trhu nespočetné množství těchto zařízení pocházejících z Číny, jejichž kvalita a výkon je nesrovnatelná s hlavními výrobci. V České republice není zaběhlých mnoho výrobců a většinou se jedná o startupy. Prostor pro vznik nových výrobců stále je, nicméně konkurence zahraničních výrobců je i přes vyšší ceny velmi silná. Prodejní ceny zahraničních longboardů se pohybují od dvaceti tisíc korun výše, a to při zajištění komplexních servisových služeb a záruk.

Cílem mojí bakalářské práce je kompletní návrh a realizace pohonu elektrického longboardu a analýza nejnižší prodejní ceny takového longboardu při dosažení zisku. Kompletní návrh znamená mechanické řešení uchycení motorů a přenosu momentu na kolečka a návrh a realizace řídicího systému a elektroniky.

### 1. Struktura longboardu a elektrického longboardu

Každý longboard je sestaven ze tří základních prvků – deska, trucky a koleček. Truck je osa pro kolečka, která udává výšku desky nad zemí. Lze ji rozdělit na dvě části – osa s kolečky, která je v jednom bodě posazená do části pevně spojené s deskou longboardu. Síla utažení spoje těchto částí určuje tuhost zatáčení. Levnější trucky se vyrábí zalitím osy do duralu, zatímco trucky vyšší kvality jsou soustruženy z oceli. Aby nedocházelo ke kroucení a možnému spadnutí řemenu z řemenic, musí být motor elektrického pohonu pevně spojen s osou. Kolečka jsou vyrobeny z plastového jádra a obalové vrstvy z různých materiálů. Průměr koleček se pohybuje v rozmezí od 50 mm do 100 mm, přičemž větší kolečka se používají zejména pro tzv. downhill jízdu ve velkých rychlostech.

Na obrázku 1 je schéma elektrického longboardu. Číslem 1, 2 a 4 jsou označeny základní prvky longboardu. Díly označené dalšími čísly jsou konstrukční prvky pohonu elektrického longboardu a budu se jimi podrobně zabývat.



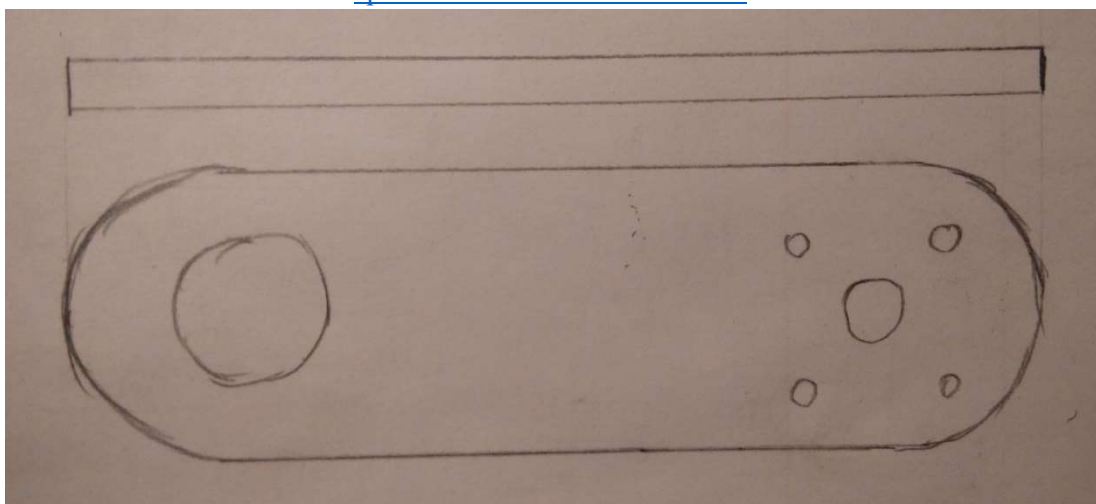
obrázek 1

Legenda:

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 1 ..... deska          | 6 ..... hnací řemenice |
| 2 ..... truck          | 7 ..... motor          |
| 3 ..... držák motoru   | 8 ..... ESC            |
| 4 ..... kolo           | 9 ..... akumulátor     |
| 5 ..... hnaná řemenice |                        |

### 1.1 Držák motoru

Díl bude při chodu zatížen radiálními silami přenášeného momentu z hřídele motoru na kola, a proto musí být držák pevně spojený s truckem. Na obrázku 2 je principiální schéma této součástky. Otvorem vlevo prochází osa a vpravo je otvor pro hřídel motoru a díry pro upevňovací šrouby motoru. Z tohoto schématu jsem při navrhování vycházel a postupně doplňoval potřebné funkční prvky, jako je možnost napínání řemenu mezi řemenicemi. Procesem návrhu se budu podrobně zabývat v části [4. Návrh a zpracování v Autodesk Inventoru](#).

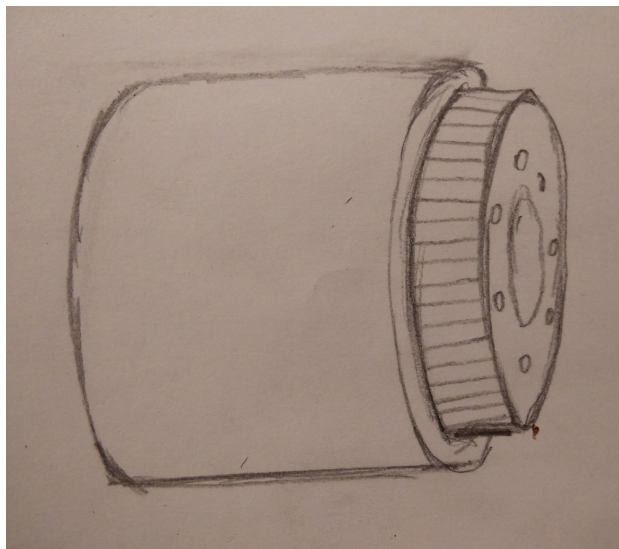


obrázek 2

## 1.2 Řemenice

Přenos momentu z hřídele na hnací řemenici (číslo 5) zajišťuje pero. Řemenice bude v axiálním směru zajištěna šroubem.

Kola longboardu mají z výroby v celé šířce průchozí otvory o průměru přibližně 5,5 mm. Pro spojení hnací řemenice a kola tak není třeba provádět žádné další úpravy kola. Pomocí šroubů M6 bude kolo spojeno s řemenicí.



obrázek 3

## 1.3 Motor

V současné době jsou v modelářství nejvíce používány bezkartáčové motory. Ve srovnání se stejnosměrnými kartáčovými motory mají delší životnost, účinnost, nevyžadují téměř žádnou údržbu a při stejných rozměrech jsou tyto motory výkonnější [2]. Longboard by měl dosahovat rychlosti až 35 km/h a zvládnout stoupání do kopce. Tomu odpovídá poměrně velký přenášený výkon, přičemž prostor na instalaci motoru mezi deskou longboardu a zemí je přibližně 12 cm. Rozměry motoru jsou tudíž důležitým faktorem a BLDC je z tohoto hlediska vhodnější. Vybral jsem pro projekt bezkartáčový motor. Výběr bezkartáčového elektronicky komutovaného motoru byl motivován také z důvodu rozšíření znalostí o řízení těchto motorů.

## 1.4 Řídicí jednotka ESC (electronic speed controller)

Bezkartáčový motor je v zásadě o motor třífázový a k jeho provozu je potřeba další elektroniky – ESC. Řídicí jednotka BLDC motoru zajišťuje komutaci, regulaci rychlosti, periferní a ochranné funkce. Regulaci rychlosti je řízena signálem z ovladače. Podle signálu je nastavena střída pulzně-šířkové modulace a v závislosti na střídě je regulován proud, a tedy také moment. Podrobně se ESC věnuji v kapitole 5.2.

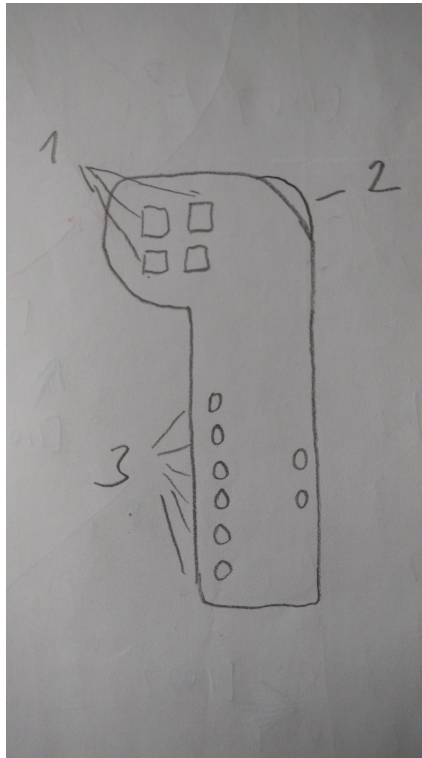
## 1.5 Akumulátor

Akumulátor musí být schopen trvale dodávat proud řádu desítek ampér v závislosti na zatížení motoru. Volba napětí akumulátoru závisí na otáčkové konstantě RPM/V motoru. Jeho kapacita je zvolena tak, aby dojezd elektrického longboardu byl přibližně 10 – 15 km.

## 1.6 Ovladač

Rychlost bude řízena pomocí jednoduchého ručního ovladače. Při návrhu jsem se inspiroval ovladači komerčně dostupných longboardů [3]. Na obrázku 4 je návrh ovladače. Číslem 1 jsou označeny

tlačítka, kterými bude možné nastavit režimy motoru, vypnutí a zapnutí motoru. Číslem 2 je označeno ovládání plynu. Ovládání je prováděno kolečkem, které je pevně spojeno s otočným potenciometrem. Výstup potenciometru je přiveden na analogový vstup Arduina [4] a programově je provedeno přepočtení střídavé napětí podle úrovně napětí. Číslem tři jsou označeny LED indikující stav baterie a režim jízdy.



obrázek 4

## 2. Dimenzování dílů

Pro výběr součástek je nutné provést výpočty, jejichž výstupem bude odhad potřebného momentu v závislosti na rychlosti v různých situacích. Níže uvádím orientační výpočty sil pro pohon člověka na longboardu o uvažované hmotnosti 80 kg a průměru kola 80 mm.

Podmínky výpočtů:

- rozjezd z klidu
- zrychlení  $a = 1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- maximální rychlost  $v_{\text{max}} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , průměrná rychlost  $v_{\text{avg}} = 8,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- maximální sklon kopce  $\alpha = 40^\circ$
- poloměr kola  $R = 0,04 \text{ m}$

### 2.1 Výpočet síly pro rozjezd

Při výpočtech jsem uvažoval valivý odpor, aerodynamický odpor a sílu potřebnou pro zrychlení.

#### 2.1.1 Vztahy

Valivý odpor:

$$F_t = \xi \frac{F_n}{R} \quad 1.$$

kde

součinitel valivého tření ..... $\xi = 0,006$  [5]

normálová složka reakce mezi kolem a vozovkou

$$F_n = \frac{F_{nc}}{4} = \frac{m \cdot g}{4} \quad 2.$$

kde

normálová složka vyvolaná longboardem ..... $F_{nc}$

normálová složka přepočítaná na jedno kolo ..... $F_n$

Aerodynamický odpor:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad [6] \quad 3.$$

kde

součinitel odporu .....  $C_d = 0,7$

hustota vzduchu .....  $\rho = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

plocha řezu těla .....  $S \approx 1 \text{ m}^2$

rychlost .....  $v$  je proměnná

Síla pro zrychlení  $F = m \cdot a$

kde

hmotnost .....  $m = 80 \text{ kg}$

zrychlení .....  $a = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### 2.1.2 Valivý odpor:

Normálová složka síly:

$$F_{nc} = 80 \cdot 9,81 = 784,8 \approx 800 \text{ N} \quad 4.$$

$$F_n = \frac{F_{nc}}{4} = 200 \text{ N}$$

Valivý odpor:

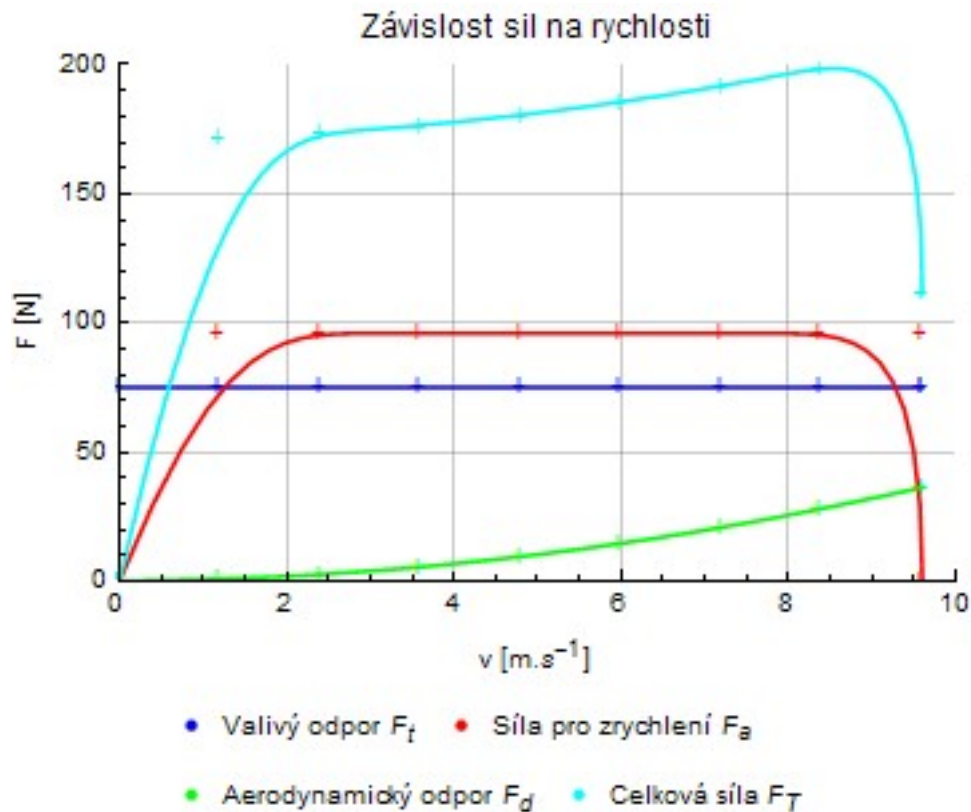
$$F_t = 0,015 \cdot \left(\frac{200}{0,04}\right) = 75 \text{ N}$$

### 2.1.3 Síla pro zrychlení:

$$F_a = m \cdot a \quad 5.$$

$$F_a = 80 \cdot 1,2 = 96 \text{ N} \approx 100 \text{ N}$$





graf 1

V grafu je vynesena závislost valivého odporu, síly pro zrychlení, aerodynamického odporu a jejich součtu, tj. celková trakční síla, na rychlosti.

## 2.2 Výpočet síly pro jízdu po rovině

- při ustálené maximální rychlosti  $v_{\max} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

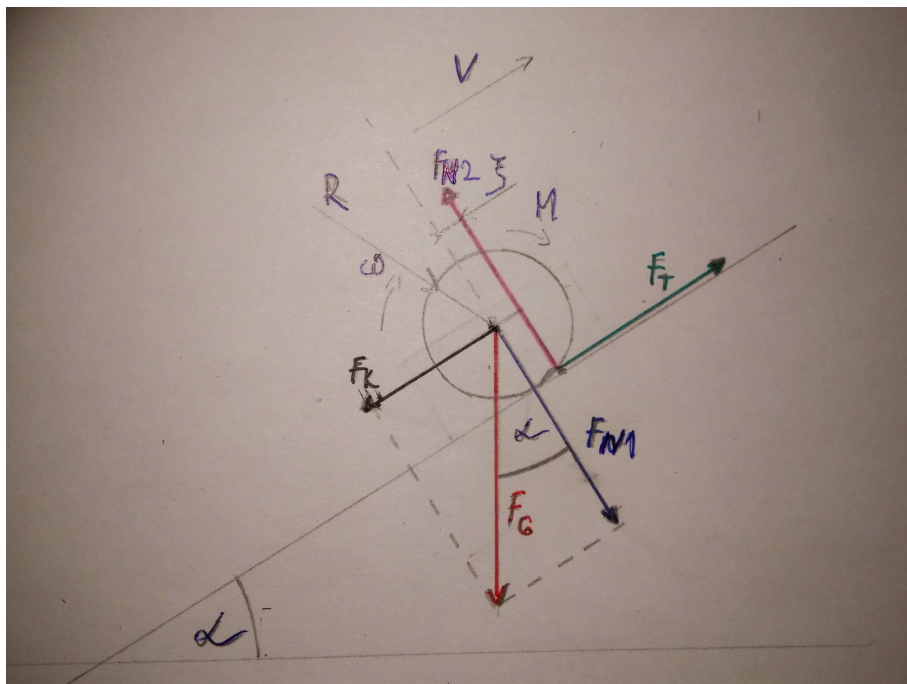
$$F_T = F_t + F_d + F_a \quad 6.$$

$$F_T = F_t + F_d + F_a = 75 + 45,9 + 0 = \mathbf{120,9 \text{ N} \approx 120 \text{ N}}$$

- při uvažované průměrné rychlosti  $v_{\text{avg}} = 8,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$F_T = F_t + F_d + F_a = 75 + 27,8 + 0 = \mathbf{102,8 \text{ N} \approx 100 \text{ N}}$$

## 2.3 Výpočet síly pro jízdu do kopce při rychlosti $v = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 5 [7]

Při jízdě do kopce působí na kola longboardu tíha  $F_g$ , kterou je možné rozložit do dvou vzájemně kolmých sil – sílu normálovou  $F_N$  a sílu pohybovou  $F_k$ . Síla pohybová způsobuje pohyb dolů po nakloněné rovině, viz obrázek 4. Pro pohybovou sílu platí vztah

$$F_k = F_G \cdot \sin(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad 7.$$



graf 2

## 2.4 Výpočet momentu

Na obrázku 4 je kromě rozkladu sil působících na kolo na nakloněné rovině také rozklad sil uvádějící kola do pohybu. Reakcí na normálovou sílu  $F_{N1}$  vzniká vlivem deformace kola reakční síla  $F_{N2}$ , která nepůsobí v těžišti kola, ale je posunuta o vzdálenost  $\xi$  (rameno valivého odporu). Přenášený moment z motoru působí trakční silou  $F_T$ . Vzorec pro výpočet potřebného momentu na obvodu kola je

$$M_{kolo} = F_T \cdot R \quad 8.$$

Potřebný moment motoru vypočítám z převodového poměru mezi kolem a hnací řemenicí.

$$i_k = \frac{2R}{d_{hnací}} \quad 9.$$

$$i_k = \frac{80}{23,87} = 3,35 [-]$$

Pro moment motoru platí

$$M_{motor} = \frac{M_{kolo}}{i_k} \quad 10.$$

t [s]	Trakční síla $F_T$ [N]	$M_{kolo}$ [N.m]	$M_{motor}$ [N.m]
0	0,0	0,0	<b>0</b>
1	171,6	6,9	<b>2,0</b>
2	173,3	6,9	<b>2,1</b>
3	176,1	7,0	<b>2,1</b>
4	180,1	7,2	<b>2,1</b>
5	185,2	7,4	<b>2,2</b>
6	191,4	7,7	<b>2,3</b>
7	198,8	8,0	<b>2,4</b>
8	207,3	8,3	<b>2,5</b>
9	111,3	4,5	<b>1,3</b>

tabulka 1

### 2.4.1 Jízda po rovině

v [m.s <sup>-1</sup> ]	Trakční síla $F_T$ [N]	$M_{kole}$ [N.m]	$M_{motor}$ [N.m]
8,4	100	4	<b>1,2</b>
10,0	120	4,8	<b>1,4</b>

tabulka 2

### 2.4.2 Jízda do kopce

Výpočty jsem prováděl při uvažování rychlosti při jízdě do kopce  $v_k = 5 \text{ m.s}^{-1}$

úhel stoupání [°]	Trakční síla F [N]	$M_{\text{kolo}}$ [N.m]	$M_{\text{motor}}$ [N.m]
25	415,7	16,6	<b>5,0</b>
30	476,5	19,1	<b>5,7</b>
35	534,2	21,4	<b>6,4</b>
40	588,5	23,5	<b>7,0</b>
45	639,0	25,6	<b>7,6</b>

tabulka 3

Potřebný moment na hřídeli pro všechny situace, které při jízdě mohou nastat znám – tj. rozjezd z nulové rychlosti na maximální, jízda maximální rychlostí po rovině, jízda průměrnou rychlostí po rovině a jízda do kopce při stanovené rychlosti 5 m.s<sup>-1</sup>. V tabulce 7 je vypočítána úhlová rychlost hnané řemenice a kola při dané rychlosti, přepočítané na otáčky hnací řemenice, tedy otáčky motoru. Postup výpočtu nebudu uvádět, jedná se o elementární výpočty. Otáčky je potřeba znát pro odhad výkon motoru.

## 2.5 Výpočet řemenice

Pro minimalizaci momentu na hřídeli motoru jsem volil největší možný převodový poměr. Protože kolo se při zatížení v místě styku s vozovkou deformuje, mohlo by při příliš velkém průměru řemenice docházet při jízdě k poškození řemenu nebo řemenice. Průměr kola je 80 mm, volil jsem proto řemenici blízko průměru 60 mm. Podle katalogu [8] je nejbližší této hodnotě řemenice **40-05m-09** o výpočtovém průměru 63,66 mm a 40 zuby. Pro zvolenou řemenici s připočtením tloušťky řemenu 3,6 mm je vnější průměr přibližně 68 mm a na deformace kola při provozu zbývá cca 6 mm od obvodu kola. Experimentálně jsem ověřil, že tato hodnota je dostatečná. Návrhový převodový poměr jsem uvažoval  $i_n = 3$ , nejbližší této hodnotě je poměr  $i = 2,7$  při použití hnací řemenice **15-05m-09** o průměru 23,87 mm a 15 zubech.

## 2.6 Otáčky

	Rychlost	Rychlost jízdy [m.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová $\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]	Obvodová v [ot.min <sup>-1</sup> ]
Hnaná	Maximální	10,0	250,0	2387
	Průměrná	8,4	210,0	2005
	Kopec	5,0	125,0	1193
Hnací	Maximální	10,0	733,3	7002
	Průměrná	8,4	615,9	5881
	Kopec	5,0	366,6	3501

tabulka 4

### 2.6.1 Úhlová rychlost kola při rozjezdu

t [s]	$\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]
0	0
1	30
2	60
3	90
4	120
5	150
6	180

7	210
8	240
9	240

tabulka 5

## 2.7 Výpočet výkonu

Výkon elektrického motoru je definovaný jako součin momentu motoru a úhlové rychlosti  $P = M \cdot \omega$  [2]. Moment i otáčky pro všechny situace jsem vypočítal, v následující tabulce jsou odpovídající hodnoty výkonů. Výsledný výkon se bude rozdělovat na dva motory. Moment na jeden motor získám vydělením celkového výkonu 2.

### 2.7.1 Rozjezd

t [s]	$M_{\text{motor}}$ [N.m]	$\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]	$P_{\text{celkový}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W], $\eta=0,8$
0	0	0	0	0	0
1	2,0	30	61	31	38
2	2,1	60	124	62	78
3	2,1	90	189	95	118
4	2,1	120	258	129	161
5	2,2	150	332	166	207
6	2,3	180	411	206	257
7	2,4	210	498	249	311
8	2,5	240	594	297	371
9	1,3	240	319	159	199

tabulka 6

### 2.7.2 Jízda po rovině

v [m.s <sup>-1</sup> ]	$M_{\text{motoru}}$ [N.m]	$\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]	$P_{\text{celkový}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W], $\eta=0,8$
8,4	1,2	210	252	126	158
10,0	1,4	250	350	175	218

tabulka 7

### 2.7.3 Jízda do kopce

Při rychlosti 5 m.s<sup>-1</sup>

úhel stoupání [°]	$M_{\text{motoru}}$ [N.m]	$\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]	$P_{\text{celkový}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W]	$P_{\text{motoru}}$ [W], $\eta=0,8$
25	5,0	125	625	313	391
30	5,7	125	712	356	445
35	6,4	125	800	400	500
40	7,0	125	875	438	547
45	7,6	125	950	475	594

tabulka 8

Maximální hodnota výkonu je 950 W při jízdě do 45° kopce. Výkon na jeden motor tak vychází přibližně 475 W. Uvažuji 80% účinností pohonného systému a hodnoty v posledním sloupci všech tří tabulek jsou předpokládáné maximální hodnoty výkonu při započtení účinnosti. Většinu trasy pojedou po rovině, výpočty pro jízdu po rovině jsou v tabulce 10. Výkon jsem spočítal pro dvě rychlosti,



$v_1 = 8,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $v_2 = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro rychlost  $v_2$  je potřebný výkon na jeden motor s uvažováním účinnosti 80% přibližně 220 W a 160 W pro rychlost  $v_1$ . Hodnoty výkonu jsou zaokrouhleny na celá čísla – výpočty jsou orientační, není třeba větší přesnosti.

## 2.8 Akumulátor

V předchozí kapitole jsem vypočítal potřebný výkon v různých situacích při jízdě na longboardu. Nyní je potřeba odhadnout, jakou část cesty pojedou maximální rychlostí, průměrnou rychlostí, jízdou do kopce, z kopce a také kolikrát budu zastavovat a znovu se muset rozjíždět z nulové rychlosti. Z toho vypočítám, kolik energie je na jednu jízdu zapotřebí.

Podmínky výpočtu:

- dojezdová vzdálenost na jedno nabití přibližně 15 km
- hmotnost akumulátoru maximálně 2 kg

### 2.8.1 Jízdní profil

15 km	
70 % rovina, průměrná rychlost	10,5 km
10 % rovina, maximální rychlost	1,5 km
10 % do kopce	1,5 km
5 % z kopce	0,75 km
5 % rozjezd	0,75 km
100 %	15 km

tabulka 9

Odhady vychází z mých vlastních zkušeností z ježdění po Praze. Nyní je potřeba vypočítat kolik energie je na trasu potřeba. Počítat budu s celkovým výkonem, nikoliv výkonem jednoho motoru.

### 2.8.2 Rozjezd

t [s]	rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Výkon pro rozjezd [W]
0	0	0
1	1,2	61
2	2,4	124
3	3,6	189
4	4,8	258
5	6,0	332
6	7,2	411
7	8,4	498
8	9,6	594
9	9,6	319
celkem	-	<b>2786</b>

tabulka 10

Rozjezd dle mých předpokladů spotřebuje přibližně 2800 J. Použitím jednoduchého vzorce vypočítám dráhu za čas při daném zrychlení. Při rozjezd z nulové na maximální rychlost je dráha 50 m →

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 9^2 = 48,6 \text{ m}.$$

Odhadem jsem stanovil na rozjezdy 5% cesty, tedy 750 m. To znamená 15 rozjezdů za jednu jízdu. Ze zkušeností z ježdění po Praze je to odpovídající.

### 2.8.3 Ostatní části trasy

Spotřeba	Výkon [W]	vzd. za 1 s [m]	čas [s]	Energie [J]
rovina, průměrná	316	8,4	1250	<b>395 000</b>
rovina, maximální	436	10	150	<b>65 400</b>
kopec (30°)	890	5	300	<b>267 000</b>
rozjezd (celkem za trasu)	2800	0 na max. = 50 m	cca 15x	<b>42 000</b>
			<b>Celková spotřeba na uvažovanou jízdu (15 km)</b>	<b>769 400</b>

tabulka 11

Celková spotřeba energie na 15 km trasy, bude asi 770 000 J. Provedu převod na Wh →

$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \rightarrow \frac{770000}{3600} = 214 \text{ Wh}$ . Budu vybírat akumulátor s kapacitou alespoň 220 Wh.

## 3. Výběr součástek

Provedl jsem všechny potřebné výpočty a nyní budu vybírat konkrétní součástky z katalogů. V tabulce 15 je přehled všech potřebných vypočítaných hodnot.

Přehled zaokrouhlených vypočítaných parametrů	
Maximální moment	3,7 N.m
Průměrný moment	0,35 N.m
Maximální výkon	1600 W
Průměrný výkon	100 W
Kapacita akumulátoru	220 Wh

tabulka 12

### 3.1 Řemenice a řemen

Výpočty momentu na hřídeli motoru jsem prováděl podle počtu zubů a průměru hnací a hnané řemenice, které jsem našel v katalogu firmy TYMA. Důvody výběru daných řemenic jsou uvedeny v části [Výběr řemenice](#).

Hnací řemenice: TYMA, rozteč 5 mm - **15-05m-09**

Hnaná řemenice: TYMA, rozteč 5 mm - **40-05m-09**

Řemen: TYMA, HTD 05M

### 3.2 Motor

U BLDC motorů je pro řízení komutace nutné znát okamžité natočení rotoru a statoru. Podle způsobu zjišťování natočení se motory dělí na senzorové a bezsenzorové.

U bezsenzorových motorů se pozice rotoru určuje podle průchodu napětí indukovaného do volné fáze nulou, tzv. back EMF (zpětné elektromotorické napětí). Jedna z metod rozběhu se řídí následujícím schématem. Dvě libovolné fáze jsou nabuzeny, tím se rotor natočí do známé polohy. Následně se nabudí dvě fáze tak, aby se rotor pootočil o 120° a tím se ve volné fázi indukuje napětí (bEMF), které je komparátorem v obvodu vyhodnoceno a na základě výsledku se dále spínají tranzistory podle komutační tabulky. V případě nezatíženého nebo lehce zatíženého motoru, jako je tomu například u modelů letadel je tato metoda dobře použitelná.

Pokud se motor rozbíhá s velkým zatížením, je výhodnější použít motoru s enkodéry pozice rotoru, kdy je v každém okamžiku známá poloha rotoru, a i při velmi malých otáčkách, a tím malém indukovaném napětí, je zajištěna správná komutace. Možným řešením situace při použití

bezsenzorového řízení je rozjezd odrazem nohou. Motor by se roztočil natolik, že by systém byl schopen, podle indukovaného napětí, správně komutovat.

Použití enkodérů pozice rotoru, např. Hallových sensorů je finančně náročnější, pro elektrický longboard však jednoznačně lepší varianta. Dodatečná instalace Hallových sensorů do motoru pro bezsenzorové řízení by byla poměrně náročná a spolehlivost by nebyla zaručena. Našel jsem výrobce BLDC motorů, který prodává motory s vestavěnými Hallovými sondami, a tím pádem by rozběh i při velkém zatížení měl být bezproblémový. Cena motoru s Hallovými sondami je oproti motoru bezsenzorovému přibližně o 300 Kč vyšší.

Výrobce udává pouze špičkový výkon motoru 2000 W. Kontaktoval jsem výrobce ohledně nominální hodnoty výkonu, přesnou hodnotu mně nedokázal sdělit, nicméně se pohybuje okolo 1000 W. Z orientačních výpočtů vím, že maximální výkon při rozjezdu na jeden motor činí přibližně 750 W. Při jízdě po rovině je průměrný výkon na jeden motor asi 100 W. Jelikož se ale jedná o orientační výpočty, je nutné vybrat motor s větším výkonem. Pro jízdu maximální rychlostí, tj.  $9,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , jsou otáčky hřídele motoru přibližně  $7000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ . Motor Alien 5065 FR je při maximálním napětí schopen točit přibližně  $n = 270 \cdot 29,6 = 7992 \approx 8000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ . V dané výkonové a cenové kategorii je vybraný motor dobrou volbou.

Parametry:

<b>Alien 5065 FR Sensored Outrunner brushless motor [9]</b>	
Průměr	50 mm
Délka	65 mm
Hmotnost	360 g
Délka hřídele	25 mm
Průměr hřídele	8 mm
Odpor vinutí	0,42 $\Omega$
Proud naprázdno	1,5 A
Maximální napětí	29,6 V
Maximální proud	60 A
Otáčková konstanta RPM/V	270

tabulka 13

### 3.3 Akumulátor

Dojezd 15 km bude možný s akumulátorem s energií 200 Wh. Při napětí 29,6 V tomu odpovídá kapacitu 7500 mAh ( $C = \frac{200}{29,6} \cdot 1000 \approx 7500 \text{ mAh}$ ). Výpočty jsou provedeny podle hrubých odhadů a můžou být velmi nepřesné. Vybral jsem proto akumulátor o kapacitě 10000 mAh. Vhodný akumulátor jsem vybral na HobbyKing.

Parametry:

<b>Turnigy Graphene Professional LiPo Pack [10]</b>	
Kapacita	10000 mAh
Napětí	4 články; 14,8 V
Proudový odběr	15C konstantně / 30C nárazově
Hmotnost	936 g
Délka	168 mm
Šířka	69 mm
Výška	40 mm

tabulka 14

Konstantní proudový odběr je 15C. Přepočít na proud provedu podle jednoduchého vzorce,  $I = 15 \cdot 10 = 150 \text{ A}$ , vynásobením kapacity v Ah a uvedené konstanty 15. Nárazově je možné odebírat až **300 A**. Maximální proud odbíraný oběma motory je 120 A, akumulátor z tohoto hlediska vyhovuje.

Nominální napětí motoru je **29,6 V**. Zapojením dvou akumulátorů do série obdržím požadované napětí. Rozměry akumulátoru mým požadavkům vyhovují.

## 4. Návrh v Autodesk Inventoru

Kompletní návrh longboardu s pohonem jsem dělal ve studentské verzi programu Autodesk Inventor. Celá kapitola je věnována postupu návrhu, odůvodním návrhu součástek a jejich významem pro systém.

### 4.1 Inspirace

Před vlastním návrhem jsem studoval konstrukci a parametry longboardů, z počátku těch nejznámějších, jako je například Boosted Board [3], Evolve [11] nebo Magneto [12], následně i „po domácí“ [13] vyrobené elektrické longboardy a na základě poznatků z hledání jsem začal vytvářet svůj návrh.

### 4.2 Deska longboardu, kola a trucky

Prvním krokem bylo vymodelovat desku, kola a trucky longboardu. Pomocí digitální posuvky jsem si s přesností na 2 desetinná místa změřil všechny potřebné rozměry a vytvořil jsem model longboardu, viz obrázek 4,5 a 6.



Obrázek 6

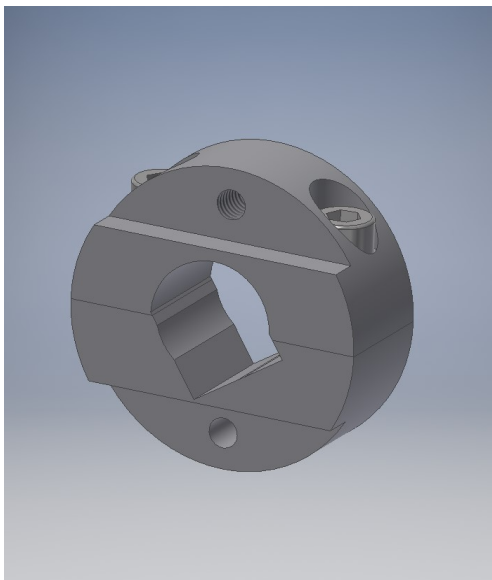
### 4.3 Držák motoru

Vycházel jsem návrhu, který je na obrázku 2 v kapitole 2. Držák motoru měl původně být přivařený k trucku, nicméně po konzultaci s vedoucím práce jsem toto řešení opustil. Přivaření součástky k trucku bylo komplikované a součástku by nebylo možné kdykoliv odstranit, navíc držák musí být přesně zarovnaný, jinak by mohlo při jízdě docházet k posunování řemenu. Pokud bych součástku přivařil nepřesně, nebylo by možné provádět žádné úpravy. Proto vznikl další návrh.

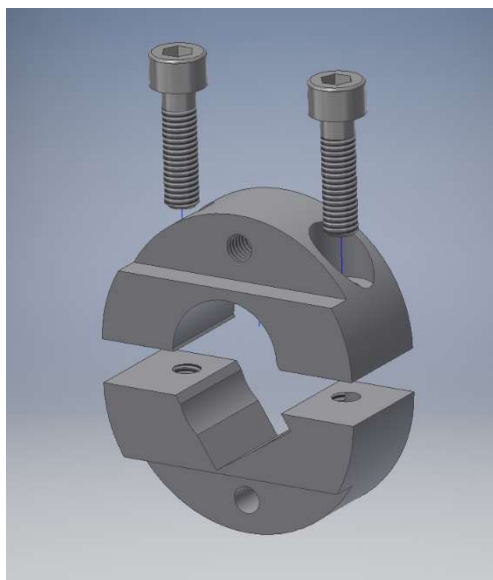
Ve druhém návrhu jsem držák rozdělil na dva díly, a to na samotný držák a svorku (obrázek 8). Svorka plní funkci objímky, která se šrouby připevní k trucku a teprve ke svorce se dalšími šrouby přimontuje

držák. V držáku jsou vytvořené drážky, které umožní posun motoru vůči trucku, a tím napínání řemenu, viz obrázky 8 – 11.

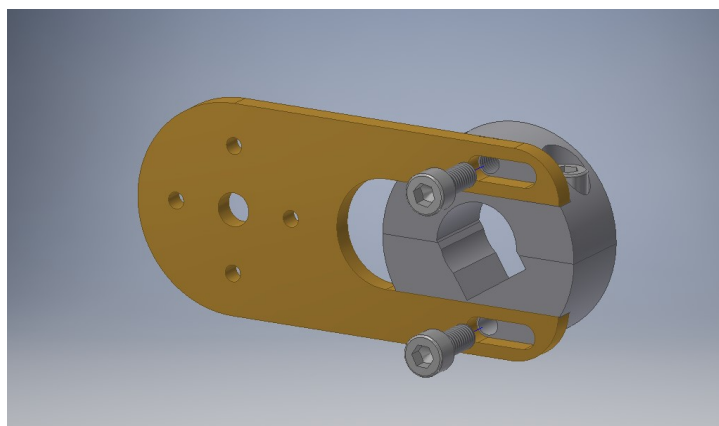
Svorka bude vyfrézována. Pro jednodušší výrobu bude hlavní otvor vyvrtán s kruhovým profilem, a poté ručně dopilována do tvaru, který je vidět na obrázcích. Vystouplá část svorky zajišťovat posun držáku ve správném směru. Úhel natočení rovných stěn hlavního otvoru ve svorce určuje úhel sklonu motoru vůči vodorovné desce longboardu. Sklon držáku motoru je  $10^\circ$ , viz obrázek 12.



Obrázek 7

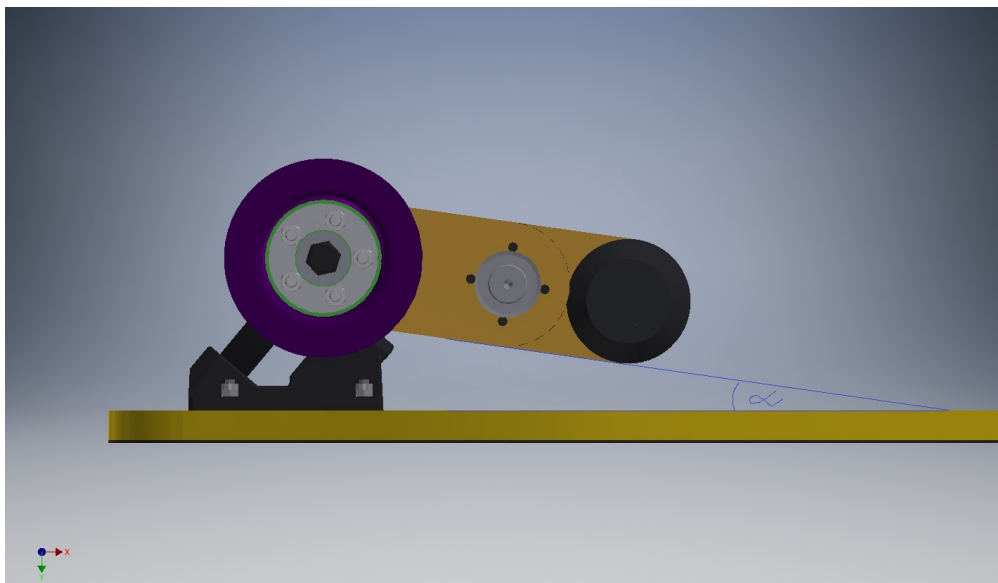


Obrázek 8

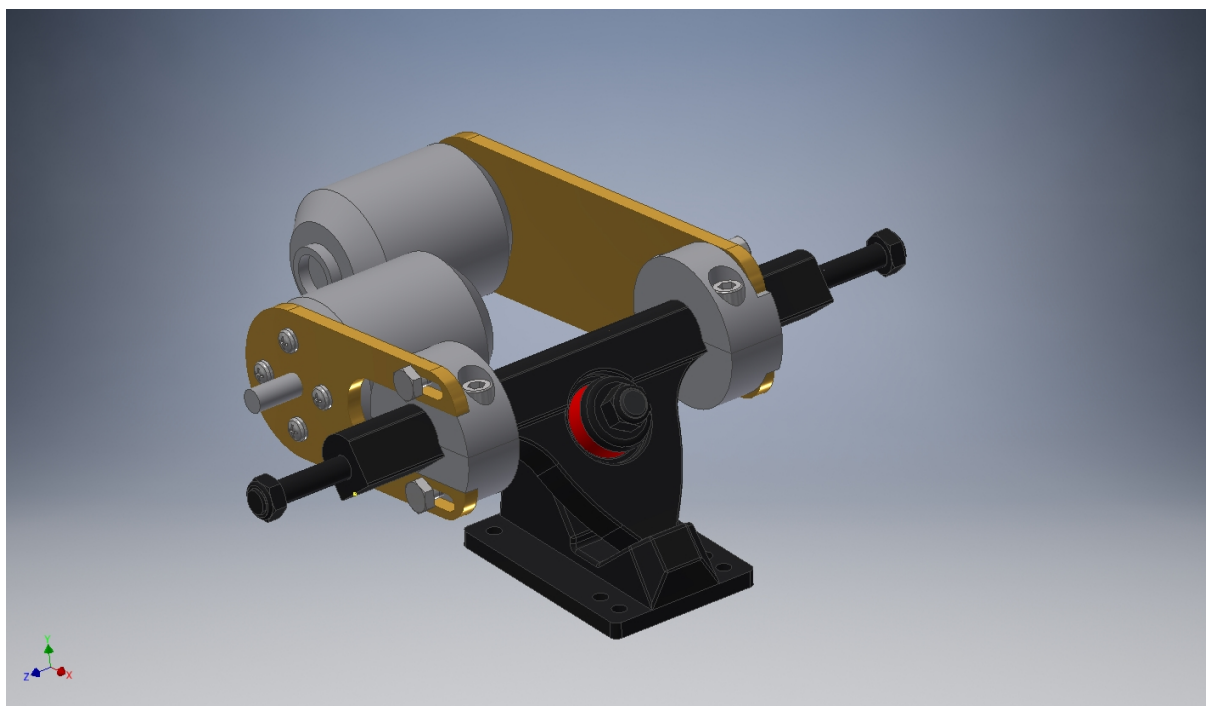


Obrázek 9





Obrázek 10



Obrázek 11

Na obrázku 13 je kompletní sestava držáku motoru. Motor je vymodelovaný podle rozměrů udávaných výrobcem. Je přidán i druhý motor, který v původním návrhu byl na stejně dlouhém držáku. Rozměry motoru však nedovolují umístění dvou vedle sebe. Jeden držák byl prodloužen. Úhel natočení delšího držáku musel být z  $20^\circ$  zmenšen na  $10^\circ$ . Hrozil by jinak dotek motoru a desky.

#### 4.4 Řemenice

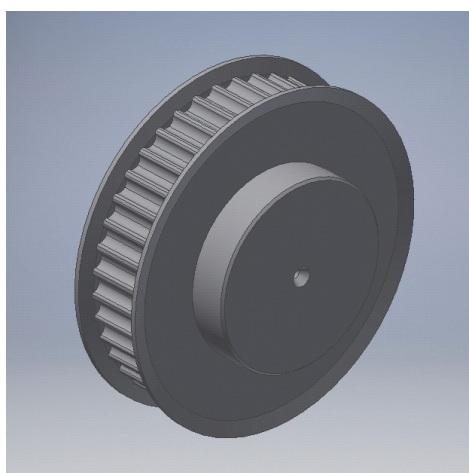
Společnost TYMA, jejichž řemenice jsem pro výpočty použil, mají na internetu k dispozici CAD modely všech řemenic [14], které vyrábí. Stáhl jsem model hnací řemenice 15-05m-09 a hnané řemenice 40-05m-09 a pracoval s nimi.

#### 4.4.1 Hnací řemenice

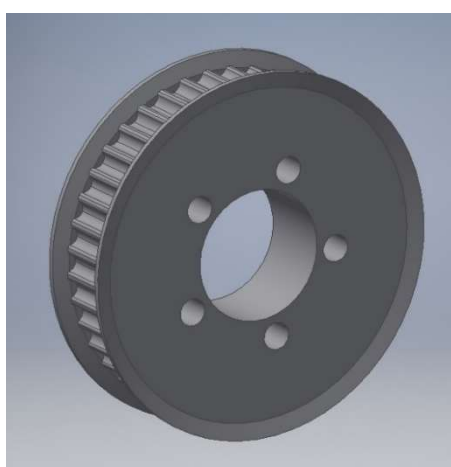
V hřídeli motoru je od výrobce vyfrézovaná drážka pro pero zajišťující přenos radiálních sil. Řemenice jsou dodávány s plným nábojem. Na hnací řemenici se proto musí vyvrtat díra pro hřídel a drážka pro pero. Síly axiální by řemenici mohli z hřídele posunout, a tak bude třeba do náboje hnací řemenice vyvrtat díru a vytvořit závit. Řemenice se poté šroubem zajistí.

#### 4.4.2 Hnaná řemenice

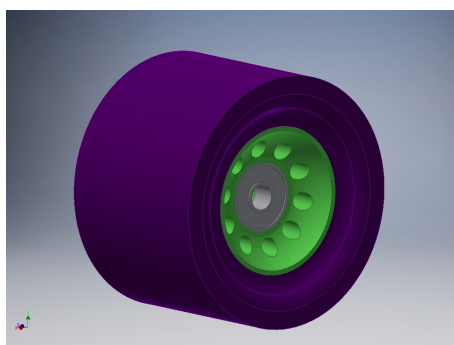
Hnaná řemenice, z výroby je dodávána s nábojem, musí být obrobena podle obrázku 14. Kromě odstranění zbytečné šířky náboje je potřeba do řemenice vyvrtat díru o průměru 23 mm. Nedojde tak k dotyku řemenice a osy. V kolu longboardu jsou vhodně umístěné díry, které lze využít pro průchod šroubů, viz obrázek 15. Řemenice bude podle děr upravena a skrz díry šrouby přimontována. Na vnitřní stranu kola je potřeba vyrobit podložku, která zajistí rovné umístění řemenice. Provedl jsem podrobná měření kola posuvným měřítkem, následně jsem vytvořil jeho model v Inventoru a poté podle modelu vhodnou podložku. Podložku nechám vyrobit na 3D tiskárně, viz obrázek 16.



Obrázek 12



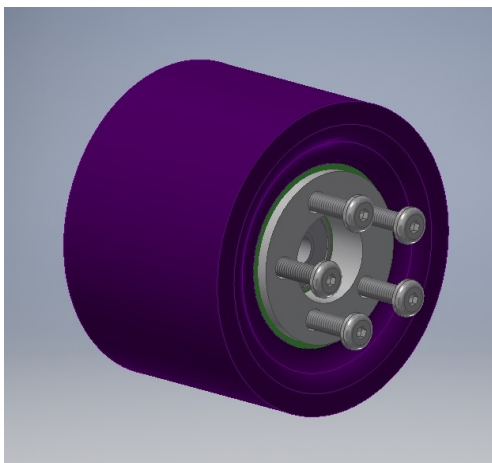
Obrázek 13



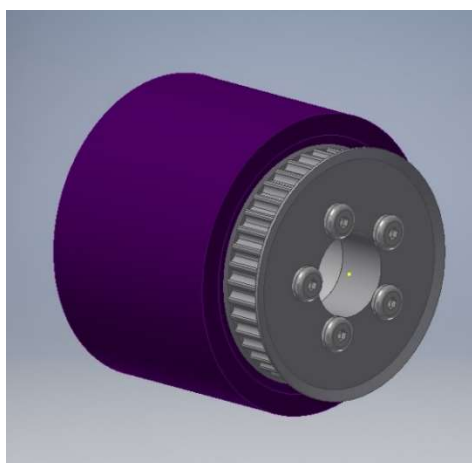
Obrázek 14



Obrázek 15

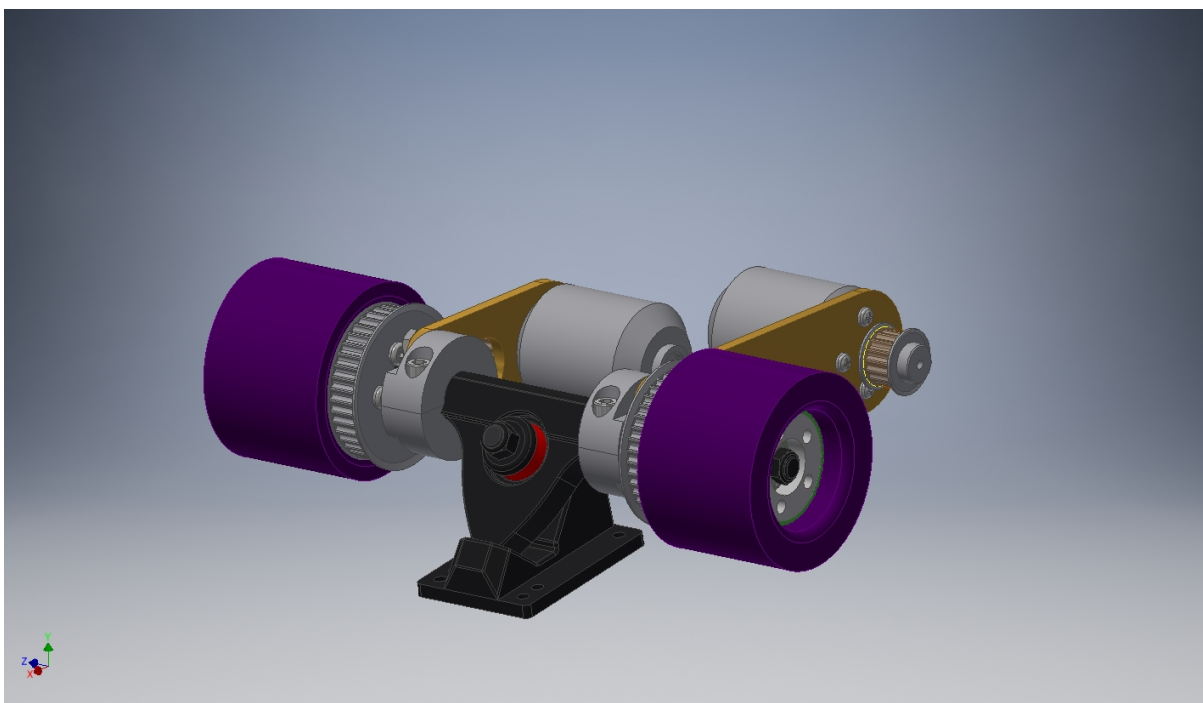


Obrázek 16



Obrázek 17

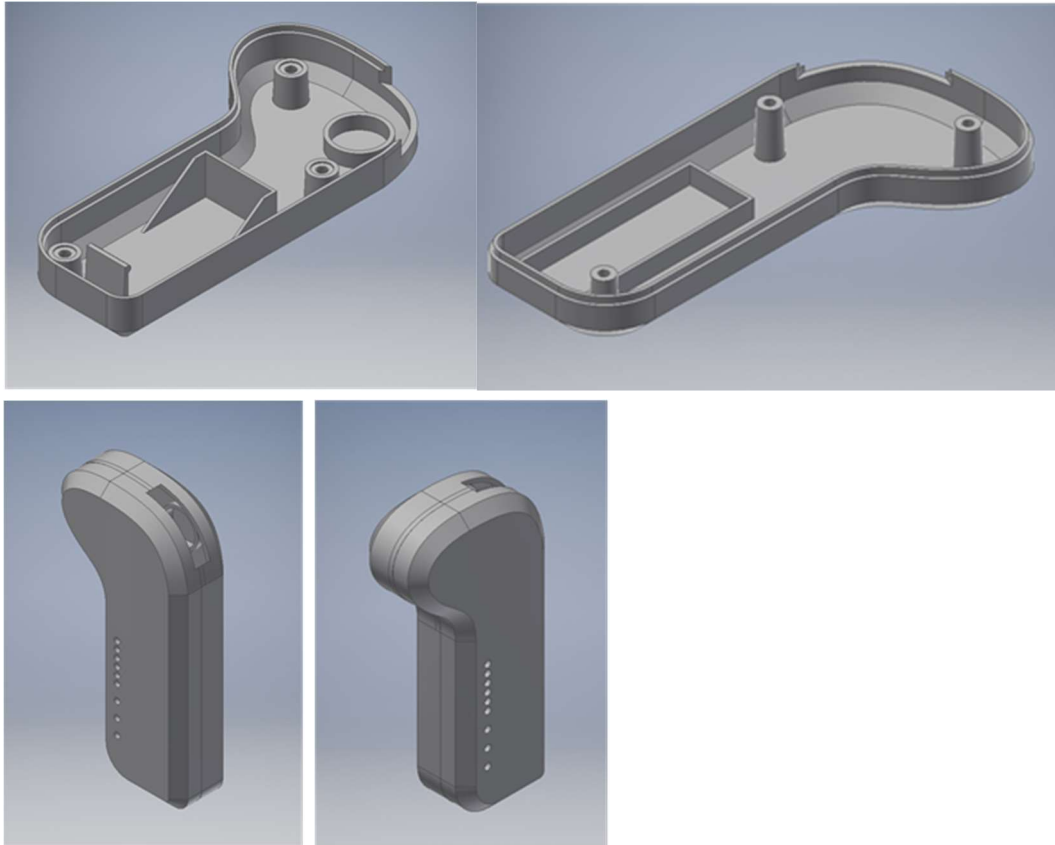
Obrázek 19 zachycuje návrh celé sestavy mechanického systému pohonu.



Obrázek 18

## 4.5 Ovladač

Návrh ovladače je inspirován ovladačem longboardu společnosti Boosted [3]. Vnější vzhled je téměř shodný s Boosted ovladačem. Uvnitř jsem si vytvořil strukturu pro upevnění 9V baterky, která bude zdrojem pro ovládací Arduino Nano a samotné Arduino Nano, jak je vidět na obrázku 19.



obrázek 19

## 4.6 Řemen

Návrh mechanické části je kompletně hotový, je potřeba vypočítat délky řemenů. Výpočtová osová vzdálenost řemenic je  $C_{v1} = 70$  mm pro kratší držák a  $C_{v2} = 130$  mm pro delší.

Pro výpočet délky řemenu je třeba znát úhel opásání  $\beta$ . Ten vypočítám podle vzorce [15]

$$\beta = 2 \cdot \arccos \frac{d_2 - d_1}{2C} \quad 11.$$

kde  $d_1$  .....průměr hnací řemenice  
 $d_2$  .....průměr hnané řemenice  
 $C$  .....osová vzdálenost

$$\beta_{v1} = 2 \cdot \arccos \frac{63,66 - 23,87}{2 \cdot 70} = 147,0^\circ$$
$$\beta_{v2} = 2 \cdot \arccos \frac{63,66 - 23,87}{2 \cdot 130} = 162,4^\circ$$

kde  $\beta_1$ .....úhel opásání pro kratší držák  
 $\beta_2$ .....úhel opásání pro delší držák

#### 4.6.1.1 Počet zubů v záběru

$$z_z = z \cdot \frac{\beta}{360} \quad 12.$$

kde

$z$ ..... počet zubů řemenice

$$z_{z1} = 15 \cdot \frac{147}{360} = 6,125$$

$$z_{z2} = 15 \cdot \frac{162,4}{360} = 6,76$$

Nyní podle vzorce

$$L_v = 2C \cdot \sin \frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{2} \left[ d_2 + d_1 + \left( 1 - \frac{\beta}{180} \right) (d_2 - d_1) \right] \quad 13.$$

vypočítám výpočtovou délku řemene  $L_v$ .

$$L_{v1} = 2 \cdot 70 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 147}{2 \cdot 180} + \frac{\pi}{2} \left[ 63,66 + 23,87 + \left( 1 - \frac{147}{180} \right) (63,66 - 23,87) \right] = 283,2 \text{ mm}$$

$$L_{v2} = 2 \cdot 130 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 162,4}{2 \cdot 180} + \frac{\pi}{2} \left[ 63,66 + 23,87 + \left( 1 - \frac{162,4}{180} \right) (63,66 - 23,87) \right] = 400,5 \text{ mm}$$

Podle vypočtených délek jsem v katalogu našel řemen, jehož délka nejbližší odpovídá vypočtené. Řemen jsem vybíral z katalogu firmy TYMA.

V katalogu jsou nejbližší hodnoty pro kratší řemen 280 mm a pro delší řemen 400 mm. Podle skutečné délky řemenů jsem přepočítal skutečnou osovou vzdálenost. Výpočtová a skutečná délka delšího řemene se liší pouze o 0,5 mm, a tak není třeba výpočet provádět.

Vzorec pro výpočet skutečné osové vzdálenosti kratšího řemene je

$$C_{sk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} \left( L - \frac{\pi}{2} \left[ (d_2 + d_1) + \left( 1 - \frac{\beta}{180} \right) (d_2 - d_1) \right] \right) \quad 14.$$

Pro delší řemen platí  $C_{v2} = C_{sk2} = 130 \text{ mm}$ .

Pro kratší řemen

$$C_{sk1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sin \frac{147 \cdot \pi}{2 \cdot 180}} \left( L - \frac{\pi}{2} \left[ (63,66 + 23,87) + \left( 1 - \frac{147}{180} \right) (63,66 - 23,87) \right] \right) = 68,33 \cong 68 \text{ mm}$$

V následující tabulce je přehled vypočítaných parametrů. Pro kratší držák jsem přepočítal úhel opásání i počet zubů v záběru podle skutečné vypočítané osové vzdálenosti.



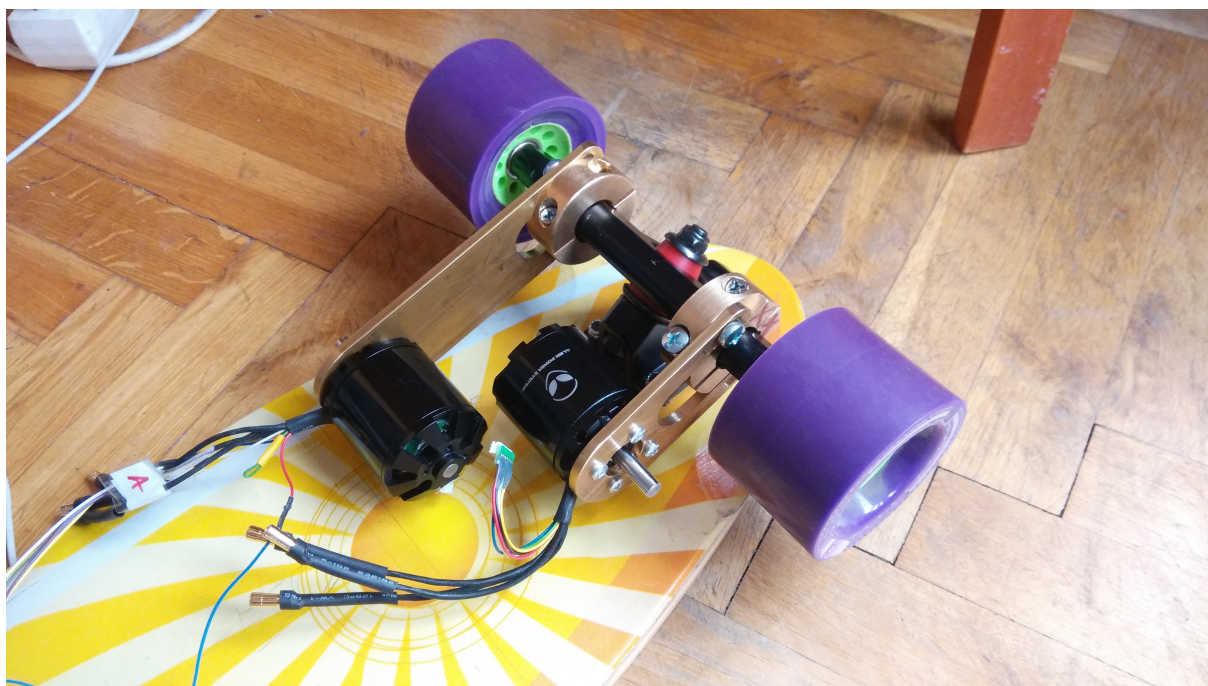
Přehled vypočítaných parametrů		
	Kratší držák	Delší držák
Délka řemene [mm]	280	400
Osová vzdálenost [mm]	68	130
Úhel opásání [°]	146,0	162,4
zubů v záběru [-]	6,08	6,76

tabulka 15

Rozměry kratšího držáku budu muset v návrhu upravit podle nových hodnot.

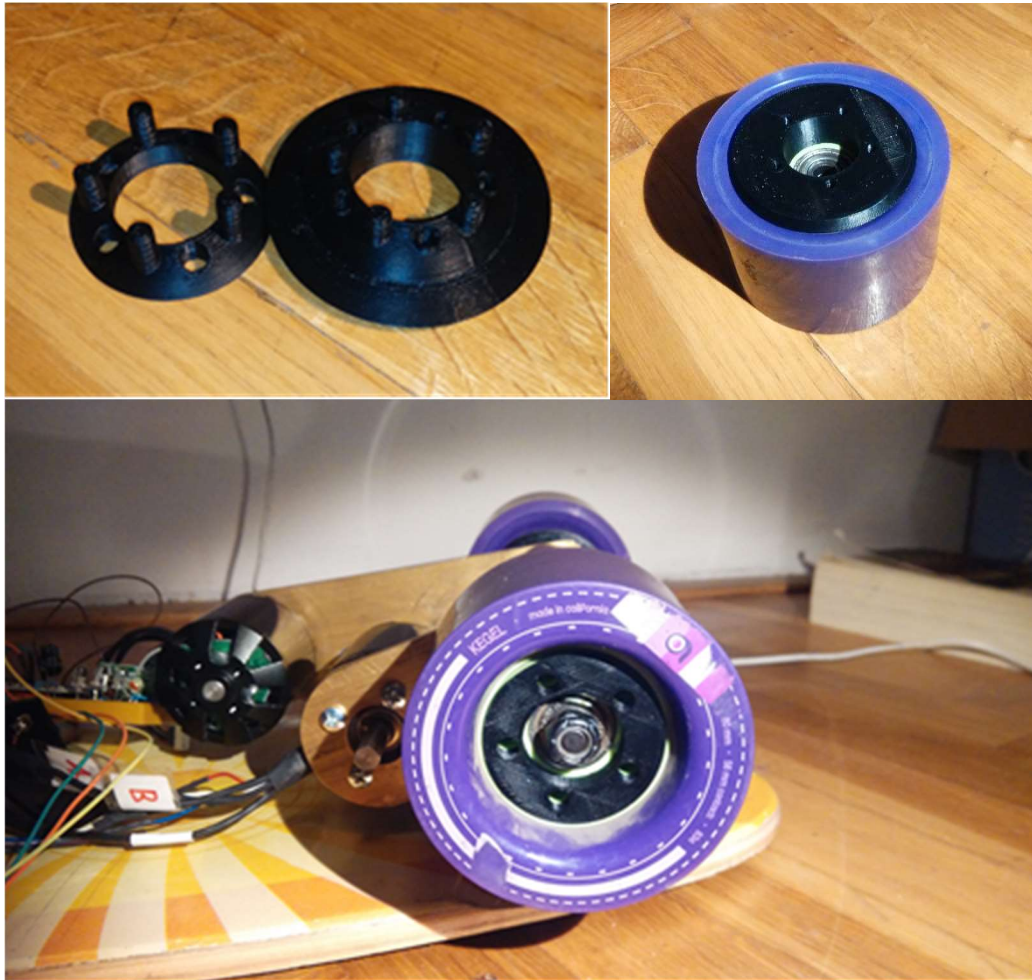
## 5. Realizace mechanické části

Mosazné díly jsem si nechal vyrobit podle výkresů v příloze. Na obrázku 19 je sestava držáků s motory. Úhel natočení delšího držáku vůči ploše desky je  $10^\circ$  a kratšího  $20^\circ$ . Kontakt motoru s deskou nehrozí.



obrázek 20

Podložky pro řemenice jsem si nechal vytisknout na 3D tiskárně a výsledek je na obrázku 20. Obě součástky perfektně zapadají do otvorů v kolečku a podložka pro řemenici je zarovnaná.



obrázek 21

Řemenice ještě vyrobeny nejsou. Čekal jsem na výrobu mosazných držáků, abych mohl proměřit, jak velký prostor pro řemenici mezi kolem a držákem bude. Kryt elektroniky také vyroben není, protože stále neznám přesné rozměry finální desky plošného spoje, a tak není možné díl nechat vyrobit.

## 6. Elektrický pohon

Elektrická část pohonu longboardu je tvořena BLDC motorem, ESC a akumulátorem.

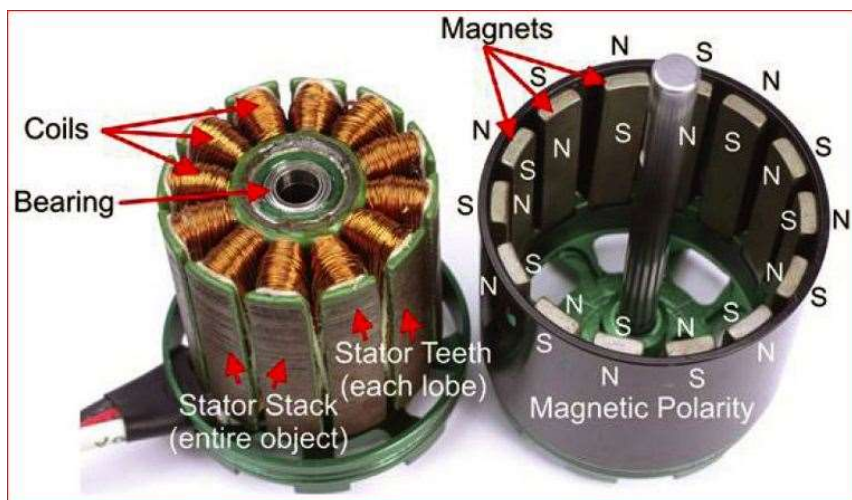
### 6.1 Bezkartáčový stejnosměrný motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor je synchronní stroj s permanentními magnety a elektronickou komutací. Podstatné výhody oproti kartáčovým motorům jsou absence mechanických kartáčů, které jsou nejnamáhavější částí těchto strojů a větší výkon při stejných rozměrech.

#### 6.1.1 Konstrukce

BLDC motor je sestaven ze statoru složeného z plechů pro elektrotechniku s pólovými nástavci, rotoru, na němž jsou umístěny velmi silné permanentní magnety, ložisek a pro senzorovou komutaci bývají umístěny enkodéry pozice. Permanentní magnety jsou u typu outrunner umístěny na točícím se plášti, zatímco u typu inrunner jsou uvnitř motoru obklopeny vinutím. Počet pólových nástavců je u většiny bezkartáčových motorů v rozmezí 8 až 16. Na statoru bývá třífázové vinutí, většinou spojeno do hvězdy a zpravidla s nevyvedeným středovým vodičem.

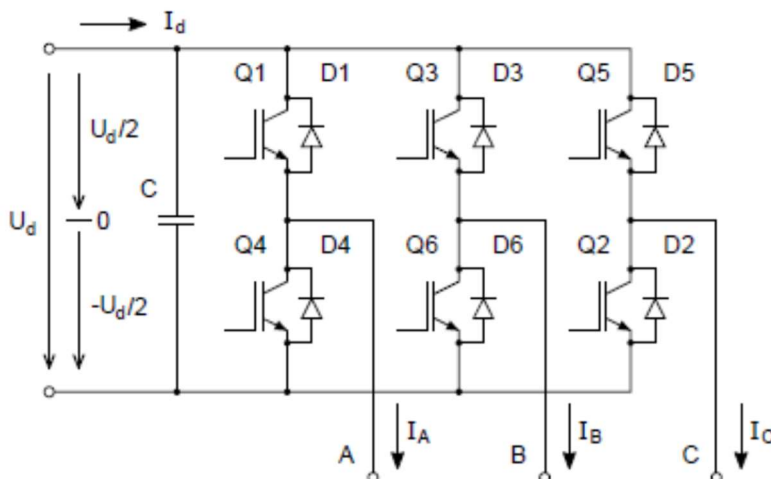
Kvůli absenci mechanických kartáčů zajišťující komutaci u kartáčových motorů, musí pohon s BLDC motorem být doplněn řídicí jednotkou, která zajišťuje komutaci. Komutace probíhá podle aktuálního natočení rotoru. Poloha rotoru se určuje dvěma způsoby – senzorově nebo bezsenzorově. Na obrázku 19 [16] je zobrazena konstrukce typického outrunner BLDC motoru.



obrázek 22

## 6.2 Řídicí jednotka ESC

Základem řídicí jednotky je invertující třífázový usměrňovač řízen procesorem, který zajišťuje přepínání fází motoru podle signálu z enkodéru polohy rotoru. Třífázový invertující usměrňovač obsahuje vždy dva tranzistoru na jednu větev. Otevření horního tranzistoru dané větve zajistí přivedení napájecího napětí k odpovídající fázi. Otevřením dolního tranzistoru je naopak fáze uzemněna. Současné otevření obou tranzistorů větve nesmí nastat, došlo by ke zkratu akumulátoru a zničení obvodových součástek.



obrázek 23 [17]

## 6.3 Pulzně šířková modulace

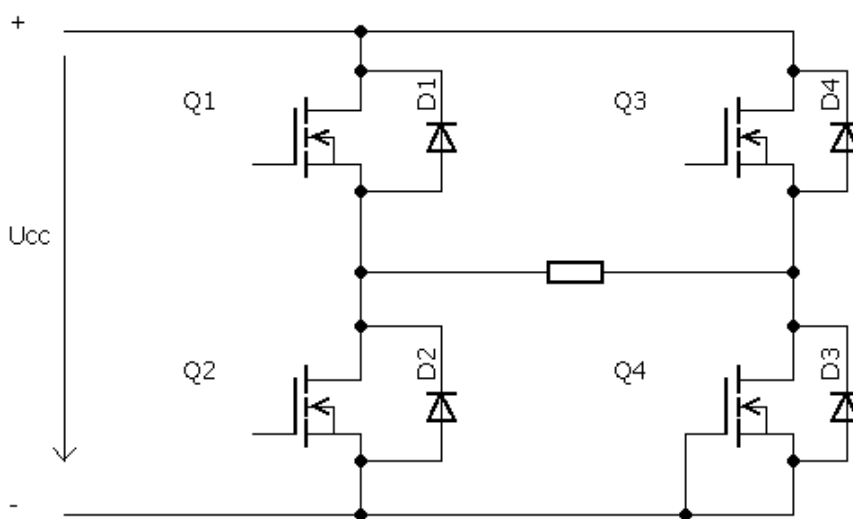
PWM se používá jako regulace energie dodávané do zátěže. Ve srovnání s odporovou regulací, při které se většina energie přeměňuje na teplo, jsou značně menší ztráty. Střední hodnota amplitudy napětí je určena poměrem doby sepnutí a vypnutí vypínatelné součástky. Tato doba se nazývá střída a



je udávána v procentech. Frekvence spínání PWM musí být tak rychlá, aby byl průběh napětí a proudu na zátěži vyhlazený. Frekvence modulace pro použití v motorovém řízení se pohybuje od jednotek do stovek kHz. Je vhodné použít PWM o frekvenci vyšší než mez slyšitelného zvuku 20 kHz.

## 6.4 Způsoby spínání střídače

Vypínatelné součástky střídače spínají podle komutační tabulky v takovém sledu, který zajistí vznik točivého magnetického pole. Zároveň jsou tranzistory spínány podle požadavků PWM modulace. Spínání se dělí podle polarit výstupního napětí na unipolární a bipolární, a dále se dělí podle způsobu spínání tranzistorů v jedné větvi střídače na komplementární a nezávislé. Při řízení motoru zůstává vždy jedna fáze střídače odpojená a střídače je řízen jako čtyř kvadrantový pulzní měnič jehož schéma je na obrázku 21.



obrázek 24

### 6.4.1 Nezávislé spínání

Pokud je PWM signál přiveden při jednom komutačním kroku na horní spínač, dolní je po celou dobu vypnutý. Fáze dané větve je připojena na napětí Vcc.

V unipolárním režimu je dolní tranzistor druhé větve po celou dobu komutačního kroku zapnutý a horní vypnutý. Je-li tranzistoru Q1 otevřený, teče proud od kladného napětí přes otevřený tranzistor Q1 do zátěže a uzavírá se přes otevřený tranzistor Q4. Když tranzistor Q1 vypne, není na motoru žádný rozdíl potenciálu a proud se uzavírá přes otevřený tranzistor Q4 a zpětnou diodu tranzistoru Q2 [17].

V bipolárním režimu je dolní tranzistor větve, kde není vykonávána PWM spínán stejně jako tranzistor, na který je přiveden PWM signál. Při sepnutí obou tranzistorů Q1 a Q4 teče proud od kladného pólu akumulátoru přes motor k zápornému pólu. Jakmile oba tranzistory vypnou a dojde k zavření všech tranzistorů, motor je připojen přes zpětné diody k zápornému pólu. Proud prochází zpětnými diodami tranzistorů Q2 a Q3. [18]

### 6.4.2 Komplementární spínání

Jak z názvu vyplývá, dochází ke komplementárnímu spínání tranzistorů v jedné větvi. Pokud je horní tranzistor sepnutý, dolní je vypnutý a naopak. Mezi sepnutím horního a dolního tranzistoru musí být vložen tzv. „deadtime“, kdy jsou oba tranzistory neaktivní. Pokud by nebyly vloženy mrtvé časy, mohlo by dojít ke zkratu ve větvi a tím zničení součástek regulátoru. Mrtvý čas je možné naprogramovat do řízení. Při využití MOSFET budičů není třeba programově vkládat, protože v budičích jsou mrtvé časy integrované. [17]

V unipolárním režimu jsou prvně sepnuty tranzistory Q1 a Q4, proud motorem se zvětšuje. V další fázi dojde k vypnutí tranzistoru Q1 a zapnutí Q3. Motor je připojen na nulový potenciál, proud prochází spodními tranzistory a jejich zpětnými diodami. V další fázi zapne tranzistor Q1 a Q3 vypne, proud prochází od kladného pólu akumulátoru motorem k zápornému pólu. V poslední fázi dojde k zavření tranzistoru Q4 a otevření Q2, horní tranzistory jsou připojeny na nulový potenciál a proud se jimi a jejich zpětnými diodami uzavírá.

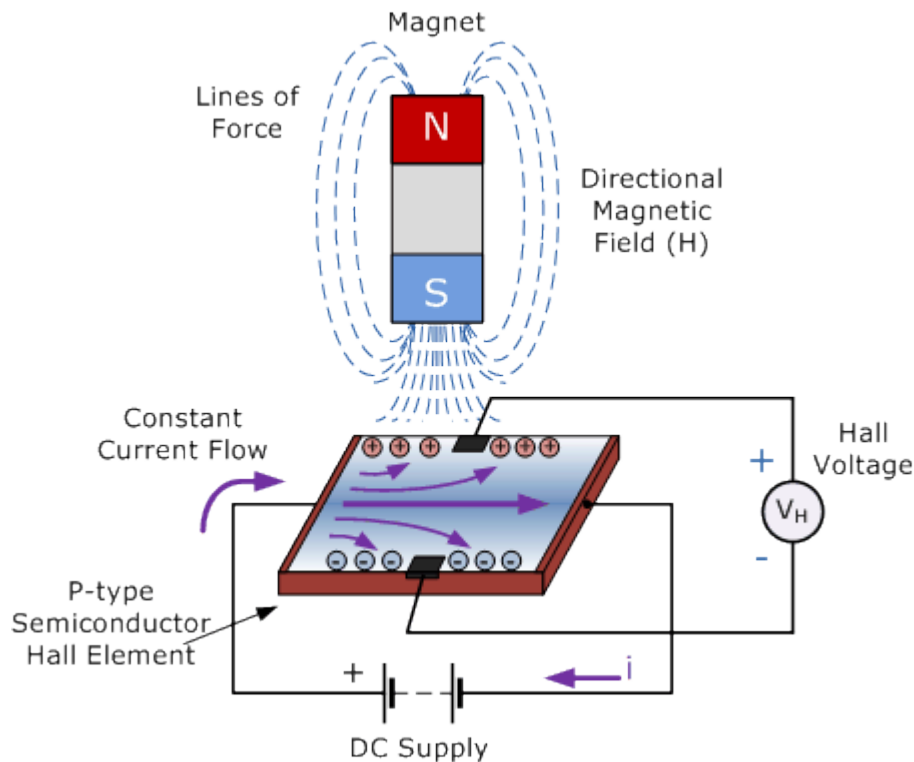
V bipolárním režimu se vzájemně spínají dvojice tranzistorů – horní jedné větve a dolní druhé větve. Při zapnutí tranzistoru Q1 a Q4 prochází proud motorem od kladného pólu k zápornému, následně dojde k vypnutí Q1 a Q4 a otevření Q2 a Q3. Proud prochází zpětnými diodami těchto tranzistorů dokud neklesne k nule, poté proud teče otevřenými tranzistory a motor může fungovat jako generátorická brzda. [17] [18]

## 6.5 Řízení

Komutace BLDC motoru se uskutečňuje vypínatelnými součástkami podle informace o aktuální poloze rotoru. Poloha se určuje z enkodéru polohy nebo pomocí metod vzorkování bEMF (back electromotoric force), tedy indukovaného napětí do volné fáze. Metody využívající vzorkování bEMF jsou problematické v případě rozjezdu s velkou zátěží. Motor, který v pohonu použijete, je od výrobce osazený Hallovými senzory. Bezsenzorovými metodami řízení se v této práci dále zabývat nebudu.

### 6.5.1 Hallové senzory

Hallové senzory jsou aktivovány externím magnetickým polem. Výstupní napětí senzorů je funkcí magnetické indukce  $B$  a polarity působícího magnetu. Pokud magnetická indukce v okolí senzoru překročí určitou mez, senzor začne generovat výstupní tzv. Hallovo napětí.



obrázek 25 [18]

Hallové senzory jsou vyrobeny z tenkého obdélníkového polovodičového materiálu typu p, kterým prochází konstantní proud. Při působení magnetického pole, začne toto pole působit silou na polovodičový materiál a odráží nosiče náboje, elektrony a díry na opačné strany polovodičového.

Následkem tohoto vzniká potenciálový rozdíl, který detekujeme jako signál. Pro jednu polaritu magnetu je signál na vysoké úrovni, pro druhou na nízké. V řízení potom tyto hodnoty odpovídají 1 a 0. [19]

### 6.5.2 Detekce polohy Hallovými senzory

Každý senzor je na jedné úrovni signálu 180° elektrických a 180° elektrických na úrovni druhé. Pro dvoupólový stroj jsou elektrické a mechanické stupně shodné, pro čtyřpólový stroj je jedna mechanická otáčka dvě otáčky elektrické. Platí vztah

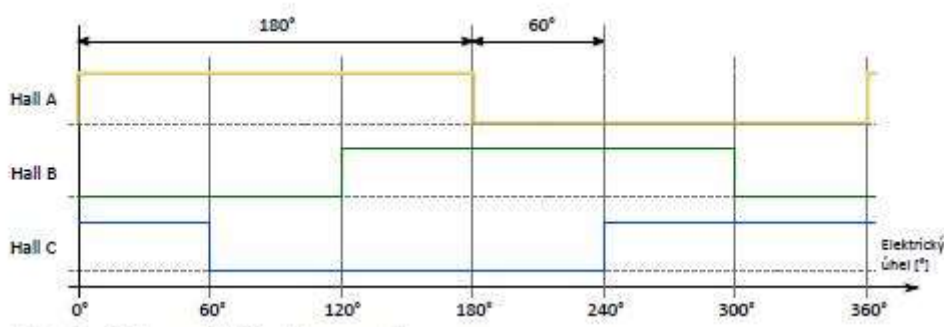
$$\text{mechanické otáčky} = \frac{\text{elektrické otáčky}}{\text{počet pólů}}$$

Pomocí tří Hallových senzorů je možné vytvořit 2<sup>3</sup> kombinací uvedených v tabulce číslo 16.

Senzor	A	B	C
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

tabulka 16

Kombinace 000 a 111 jsou neplatné, vzniká tak 6 možných kombinací, podle kterých se bude řídit komutace motoru tzv. 6 krokovou komutační strategií. Na obrázku 23 je grafické znázornění správného průběhu výstupu z H. senzorů.



obrázek 26

Každý motor má však senzory poskládané v jiném pořadí a kombinace se neřídí posloupností dle tabulky číslo 16. Proto je nutné provést kalibraci a dle ní vytvořit komutační tabulku motoru.

### 6.5.3 Kalibrace Hallových senzorů

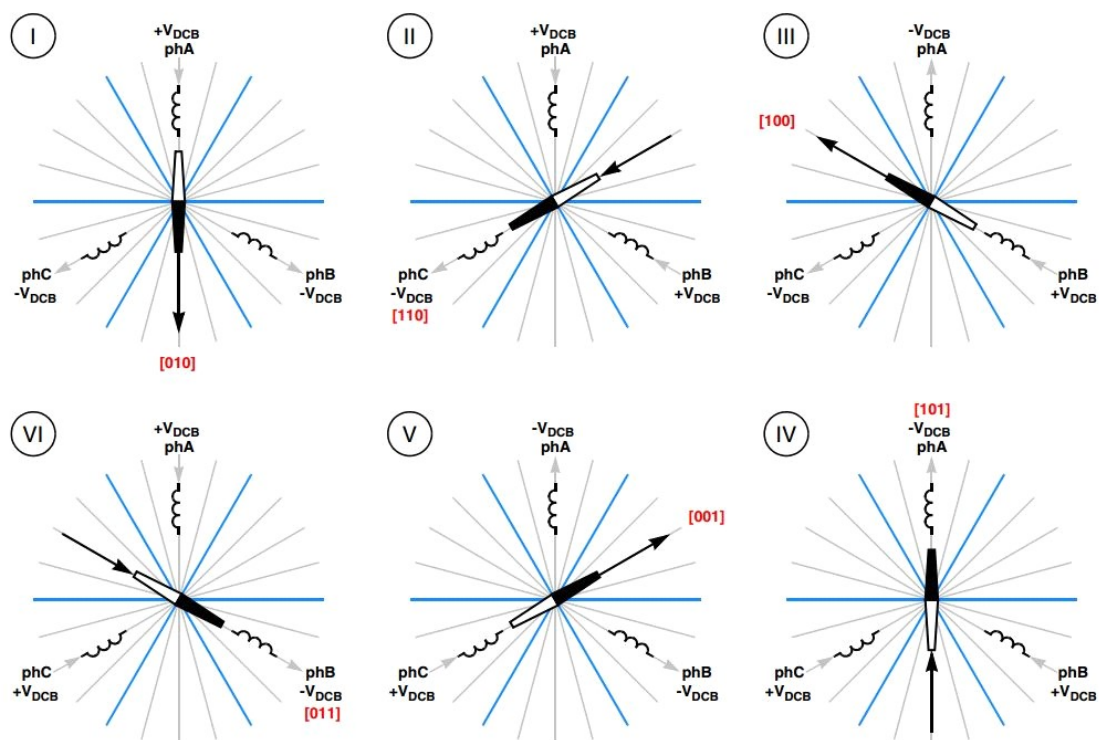
Správnou kombinace hallových senzorů pro jednotlivé komutační sektory je možné určit připojením vždy dvou fází motoru k jedné polaritě napětí a jedné fáze k polaritě opačné. Rotor se natočí do polohy, která odpovídá jednomu komutačnímu sektoru, a stejným postupem se provede natočení rotoru do všech sektorů. Zároveň je nutné v každém sektoru odměřit stav hallových senzorů a

zaznamenat výsledky do tabulky. Tím vznikne komutační tabulka. Výsledky kalibrace mého motoru jsou v tabulce 17.

$U_A$	$U_B$	$U_C$	Hall A	Hall B	Hall C
$U_{CC}$	GND	GND	1	0	0
$U_{CC}$	$U_{CC}$	GND	1	1	0
GND	$U_{CC}$	GND	0	1	0
GND	$U_{CC}$	$U_{CC}$	0	1	1
GND	GND	$U_{CC}$	0	0	1
$U_{CC}$	GND	$U_{CC}$	1	0	1

tabulka 17

Připojením fází motoru na napětí dle předchozí tabulky vznikne 6 vektorů znázorněných v obrázku 24 [18].



obrázek 27

#### 6.5.4 Komutační vektory

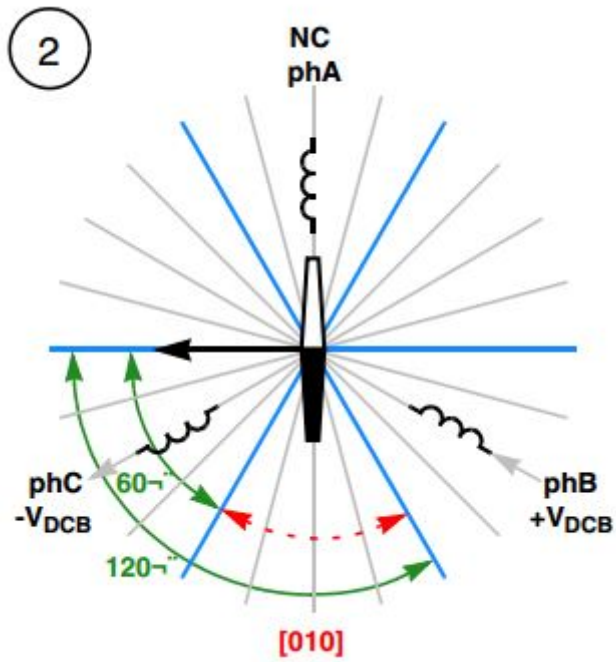
Motor vytváří největší moment při úhlu mezi magnetickým tokem rotoru a statoru  $90^\circ$ . Při šesti-krokové komutační strategii připadá na jeden komutační sektor  $60^\circ$  elektrických a úhel mezi tokem rotoru a statoru se tak pohybuje od  $120^\circ$  do  $60^\circ$  elektrických. Komutační vektory vytvořím podle tabulky 18 tak, aby tok statoru vždy předbíhal rotor o jeden komutační krok.

Hall A	Hall B	Hall C	A	B	C	Dekadicky
1	1	0	$U_{CC}$	GND	0	6
0	1	0	$U_{CC}$	0	GND	2

0	1	1	0	$U_{CC}$	GND	3
0	0	1	GND	$U_{CC}$	0	1
1	0	1	GND	0	$U_{CC}$	5
1	0	0	0	GND	$U_{CC}$	4

tabulka 18

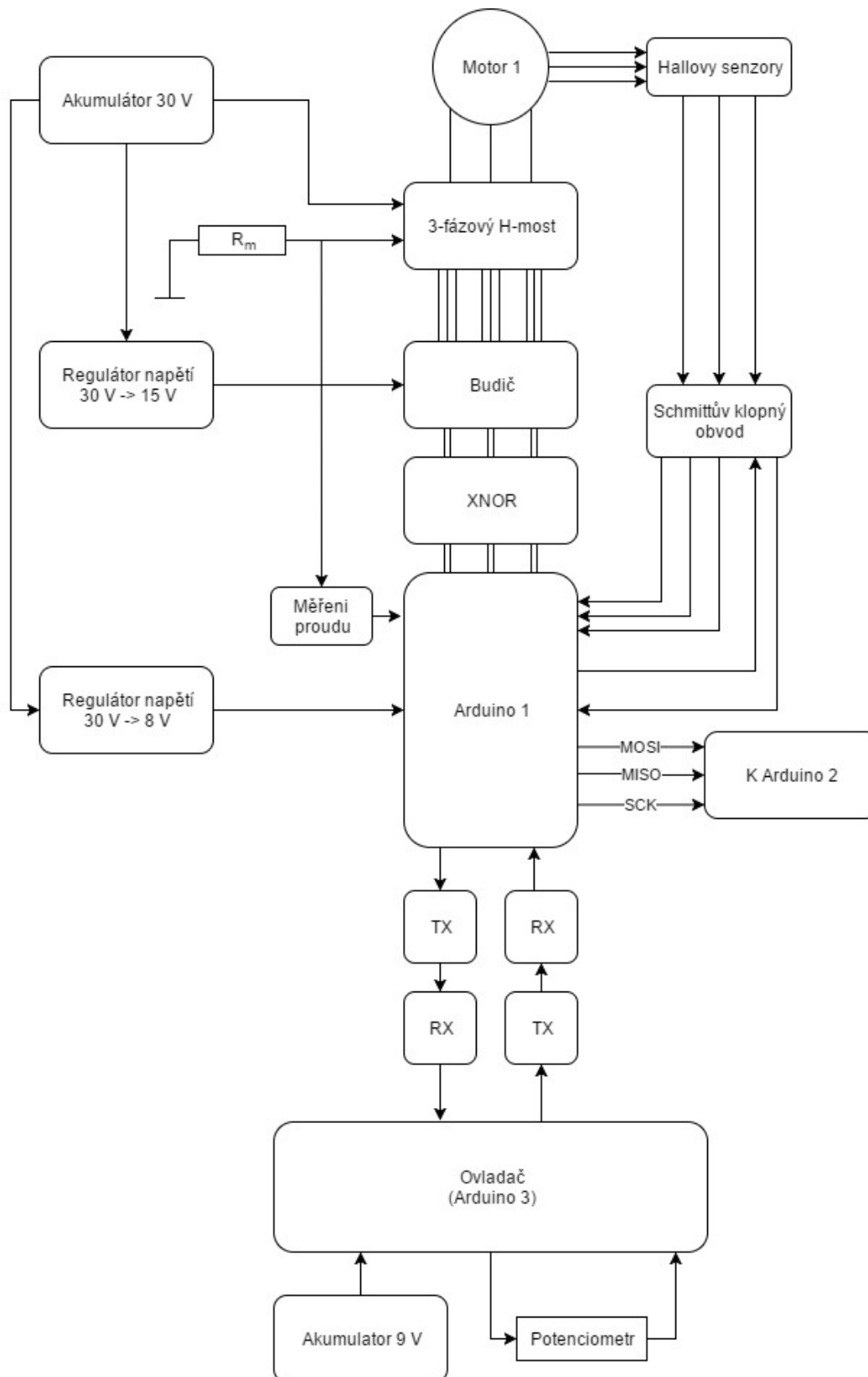
V posledním sloupci tabulky 18 je uveden dekadický ekvivalent součtu hallových senzorů, přičemž nejmenší váhu jsem přidělil Hall C a největší Hall A. Na obrázku 25 je znázorněn uhel mezi toky.



obrázek 28 [18]

## 7. Návrh a realizace elektroniky

Struktura celé elektroniky jednoho motoru je znázorněna v blokovém schématu na obrázku 26. Kompletní schéma zapojení je v příloze 1.



obrázek 29

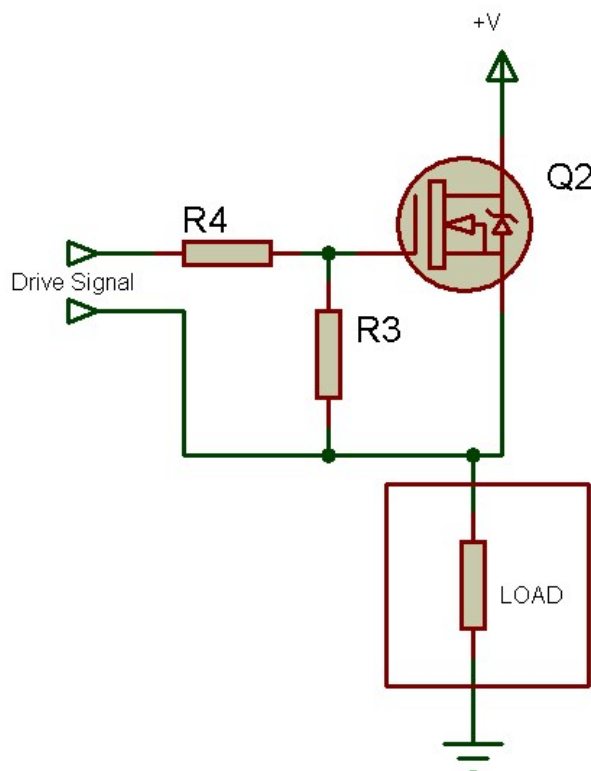
Hlavní napájení je osmi článkový Li-Poly akumulátor s kapacitou 10 Ah. Akumulátor přímo napájí motor. Budič a Arduino jsou napájeny z napěťových regulátorů napětím 15 V (budič) a 8 V (Arduino). Řízení motoru a všech procesů zajišťuje Arduino Micro, které je bezdrátově ovládané Arduinem Nano. Bezdrátová komunikace probíhá po sériové lince pomocí RF modulů. Vzájemná komunikace Arduina 1 a 2 obou motorů probíhá po SPI lince. Výstup hallových senzorů z motoru je veden přes RC filtr a dále přes Schmittův klopný obvod k Arduino 1.

## 7.1 Třífázový H most – tranzistory

Jako výkonové vypínatelné součástky jsem do H mostu zvolil výkonové MOSFET tranzistory. Maximální proud motorem je podle výrobce 60 A. Hlavní kritériem tak byla proudová zatížitelnost více než 60 A a velmi nízké  $R_{DS}$ , v řádu tisícín ohm. Kvůli horší mobilitě nosičů, a tak vyšší odporu P-kanál MOSFET jsem do mostu jako horní i dolní MOSFET navrhl N-kanály. [21]

Při ladění obvodu na nepáživém poli jsem použil MOSFET IRF3205 s hlavními hodnotami  $V_{DS} = 55 \text{ V}$ ,  $R_{DS(ON)} = 8.0 \text{ m}\Omega$  a  $I_D = 110 \text{ A}$ . Motor nebyl při ladění plně zatížen a proud 60 A nikdy nebylo dosaženo. Pro finální návrh na DPS jsem zvolil MOSFET IRF2907s parametry  $V_{DS} = 75 \text{ V}$ ,  $R_{DS(ON)} = 4.5 \text{ m}\Omega$  a  $I_D = 160 \text{ A}$ .

Minimální napětí mezi elektrodami G a S – napětí  $U_{GS(th)}$  pro otevření N-kanálu je pro vybrané MOSFETy 2 – 4 V. Pro dolní tranzistory, jejichž source elektroda je spojen se zemí, je 5 v z Arduina dostatečné k plnému otevření. Horní tranzistory mají elektrodu source připojenou na zátěž. Napětí na zátěži po otevření tranzistoru bude +30 V, a napětí 5 V na gate by MOSFET neudrželo ve stavu otevření. Proto bylo potřeba použití bootstrap obvodu. Na obrázku 27 je zapojení MOSFET tranzistoru před zátěží.



obrázek 30 [22]

## 7.2 Budič bootstrap

Budič pro MOSFET tranzistory jsem se rozhodl použít, protože mají integrovaný kanál pro bootstrap a mrtvé časy. Vedoucí práce měl k dispozici budiče IR2103 jejichž parametry vyhovovaly mým potřebám. Pro prototypní verzi byly proto použity. Ve finální SMD verzi jsou tři budiče IR2103 pro každou větev H mostu nahrazeny jedním budičem IR21364.

Oproti nábojové pumpě není při použití bootstrap obvodu možné spouštět motor při střídě 100%. Bootstrap kondenzátor se nabíjí při vypnutí horního a zapnutí dolního tranzistoru. Při střídě 100% by nedocházelo k nabíjení kondenzátoru a uložený náboj by se po určité době vyčerpal, čímž by došlo k zavření tranzistoru.

Pro minimální velikost bootstrap kondenzátoru platí vztah [23]:

$$C \geq \frac{2 \left[ 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{Min}}$$

kde

$Q_g$  = celkový náboj gate elektrody MOSFETu na horní straně mostu

$f$  = frekvence

$I_{Cbs(leak)}$  = svodový proud kondenzátoru (jen u elektrolytických kondenzátorů)

$I_{qbs(max)}$  = maximální  $V_{BS}$  klidový proud

$V_{CC}$  = zdroj napětí

$V_f$  = napěťový úbytek na bootstrap diodě

$V_{LS}$  = napěťový úbytek na zátěži nebo dolním MOSFETu

$V_{Min}$  = minimální napětí mezi  $V_B$  and  $V_S$ .

$Q_{ls}$  = náboj potřebný pro změnu úrovně (level shift) při jednom cyklu (typicky 5 nC pro 500 V/600 V MGD)

Podle dokumentu IRF AN-978 [23] by hodnota použitého kondenzátoru měla být mnohonásobně vyšší než výsledek výpočtu. Z datasheetu tranzistoru IRF3205 a budiče IR2103 jsem zjistil potřebné hodnoty pro výpočet. V tabulce 19 uvádím zároveň hodnoty pro součástky použité ve verzi prototypu a ve finální verzi.

IR2103 a IRF3205			IR21364 a IRF 2907	
Veličina	Hodnota	Jednotka	Hodnota	Jednotka
$Q_g$	146	nC	270	nC
$f$	32500	Hz	32500	Hz
$I_{Cbs(leak)}$	-		-	
$I_{qbs(max)}$	55	uA	120	uA
$V_{CC}$	15	V	15	V
$V_f$	0,6	V	0,6	V
$V_{LS}$	0,48	V	0,48	V
$V_{min}$	10	V	11,5	V



Q <sub>ls</sub>	5	nC	5	nC
C <sub>B(MIN)</sub>	150	nF	450	nF
C <sub>B</sub>	1	uF	2	uF

tabulka 19

Výsledná hodnota vychází na 150 nF, s ohledem na doporučení použití několikanásobně většího kondenzátoru jsem použil kondenzátor 1 uF.

Stejným postupem jsem provedl výpočet pro budič a tranzistor, které budou použity ve finální verzi.

Výsledná hodnota bootstrap kondenzátoru C<sub>B</sub> = 450 nF, použil jsem do finální verze kondenzátor 2 uF.

### 7.3 XNOR gate

Vstup LIN je u budič IR2103, který byl použit v prototypovém návrhu negovaný. V tomto návrhu bylo místo hradla XNOR použito hradlo XOR. Budič IR21364 nemá negovaný vstup LIN, nicméně rozhodnutí o změně budiče jsem učinil až po dokončení programu. Použitím hradla XNOR je při použití stejného programu stejný výstup z budičů.

V tabulce 20 je pravdivostní tabulka.

XNOR		IR21364				
PWM	KOM	HIN	LIN	HO	LO	FÁZE
0	1	0	0	0	0	-
0	0	0	1	0	1	GND
1	0	1	0	1	0	U <sub>CC</sub>
1	1	1	1	0	0	-

tabulka 20

kde

PWM .....signál PWM z Arduina

KOM.....signál z Arduina

HIN.....vstup do budiče – high

LIN .....vstup do budiče – low

HO .....výstup z budiče / signál na gate – high

LO.....výstup z budiče / signál na gate – low

### 7.4 Schmittův klopný obvod a RC filtr

Výstup z hallových senzorů obsahuje rušení a úroveň signálu je pod hranicí 2 voltů. Rušení je omezeno dolnoproustným RC filtrem. Maximální frekvenci z jednoho senzoru jsem vypočítal podle následující úvahy. Maximální rychlost točení 8000 ot.min<sup>-1</sup>, 6 elektrických otáček za jednu mechanickou, přičemž změna stavu senzoru nastane dvakrát za jednu elektrickou otáčku. Maximální frekvence je potom:

$$f_{Hall(MAX)} = \frac{RPM \cdot \text{počet el. ot za mech. ot} \cdot \text{změn za el. ot}}{60} = \frac{8000 \cdot 6 \cdot 2}{60} = 1600 \text{ Hz}$$

Mezní frekvenci jsem zvolil f<sub>0</sub> = 2000 Hz. Podle známého vzorce  $f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$  jsem vypočítal parametry R a C. Při rychlosti otáčení 8000 ot.min<sup>-1</sup> se signál ze senzorů mění každých 0,7 ms. Časová konstanta filtru τ musí být značně menší, aby nedocházelo k relativně velkému zpoždění a tím

ovlivnění komutace. Zvolil jsem proto hodnotu kondenzátoru  $C = 2,2 \text{ nF}$  a dopočítal jsem odpor,  $R = 470 \Omega$ . Časová konstanta filtru je  $\tau = 1 \text{ us}$ , filtr tak na komutaci nemá značný vliv.

Schmittův obvod zajišťuje zesílení signálu na 5 V a zároveň signál invertuje.

## 7.5 Regulátory napětí

V systému jsou potřebné 4 úrovně napájecího napětí – plné napětí akumulátoru 30 V pro napájení motoru, 15 V pro napájení budiče a nabíjení bootstrap kondenzátoru, 8 V pro napájení řídicího Arduina a 5 V pro logické členy. Napětí 15 V a 8 V je vyrobeno regulátory napětí, 5 V poskytuje Arduino.

Jako regulátor napětí jsem vybral součástku TL2575-adj s širokým rozmezím vstupního napětí 4,75 – 40 V a programovatelným výstupním napětím.

Datasheet regulátoru uvádí doporučené zapojení a výpočty hodnot jednotlivých součástek pro potřebné napětí. Pro výstupní napětí platí vztah:

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

kde  $V_{REF} = 1,23 \text{ V}$ . Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze ve schématu.

## 7.6 Měření proudu

Měření proudu je ochranná funkce obvodu. Při překročení hodnoty 60 A dojde k automatickému zablokování všech tranzistorů, dokud proud nepoklesne. Proud měřím před motorem. Srovnání výhod a nevýhod měření před a za zátěží jsou v tabulce 21. [24]

Před zátěží	Za zátěží
<b>Výhody</b>	<b>Výhody</b>
nízké vstupní souhlasné napětí	zátěž je přímo uzemněná
výstupní napětí měřeno vůči zemi	nadproud detekován před průchodem zátěží
jednoduchý návrh	<b>Nevýhody</b>
<b>Nevýhody</b>	vysoké vstupní souhlasné napětí
zátěž není připojena přímo k zemi	výstupní signál musí být omezen na napětí řídicího systému
nadproud detekován až po průchodu zátěží	

tabulka 21

Integrovaný obvod INA225 s programovatelným zesílením s rozsahem souhlasného napětí 0 – 36 V je vhodný pro měření před zátěží. Výhody uzemnění zátěže a detekce nadproudu před vstupem do motoru převažují nevýhody, proto proud měřím před zátěží. Jako měřicí odpor jsem použil shunt odpor WSLP2726 o odporu 0,3 mΩ. Při 60 A bude na odporu napětí 18 mV, nastavením zesílení 200 V/V získám na výstupu z proudového měřiče 3,6 V, při 10 A bude na výstupu 0,6 V. Analogový vstup Arduina 0,6 V dokáže zpracovat a nižší hodnoty proudu není třeba sledovat, jde o ochranný prvek před nadproudem, nikoli přesné měření malých proudů.

## 7.7 Přijímací a vysílací modul

Velmi nízká pořizovací cena modulů byla hlavním důvodem jejich výběru. Vysílací frekvence je 433 MHz, podle datasheetu je citlivost -100 dBm, vysílací výkon 25 mW a dosah až 200 m. Skutečným dosahem a dalšími podrobnostmi se budu zabývat v kapitole programování modulů.

Na longboardu i na ovládači jsou přijímací i vysílací modul. Komunikace jedním modulem je jednocestná, a tím pádem je druhý modul nutný proto, aby bylo možné oboustranně komunikovat.

## 8. Software

Řídicí software jsem programoval v prostředí Arduino IDE, volně dostupné na oficiálních webových stránkách společnosti Arduino [4]. Arduino Micro pracuje s 16 MHz procesorem, je optaženo 20 digitálními I/O piny, na 7 pinech je možné použít režim PWM a 12 analogových pinů. Předem jsem neměl plán struktury programu ani funkcí..

### 8.1 Komutace

Kombinací komutační tabulky (kapitola 5.5.4, tabulka 18) a pravdivostní tabulky XNOR gatu (tabulka 20) jsem vytvořil tabulku 22, podle které jsem programoval komutaci.

Dek	A	B	C				A		B		C	
				PWM	KOM	FÁZE	PWM A	KOM A	PWM B	KOM B	PWM C	KOM C
6	U <sub>CC</sub>	GND	0	PWM	KOM	FÁZE	1	0	0	0	0	1
2	U <sub>CC</sub>	0	GND	0	1	-	1	0	0	1	0	0
3	0	U <sub>CC</sub>	GND	0	0	GND	0	1	1	0	0	0
1	GND	U <sub>CC</sub>	0	1	0	U <sub>CC</sub>	0	0	1	0	0	1
5	GND	0	U <sub>CC</sub>	1	1	-	0	0	0	1	1	0
4	0	GND	U <sub>CC</sub>				0	1	0	0	1	0

tabulka 22

První sloupec tabulky obsahuje dekadické vyjádření hodnoty z hallových senzorů při zapojení na piny Arduina, které odpovídají pinům procesoru s váhou 0,1 a 2. Bit s nejmenší váhou jsem zvolil signál z hallových senzorů fáze C. Výpočet dekadické hodnoty je poté dán dle vztahu:

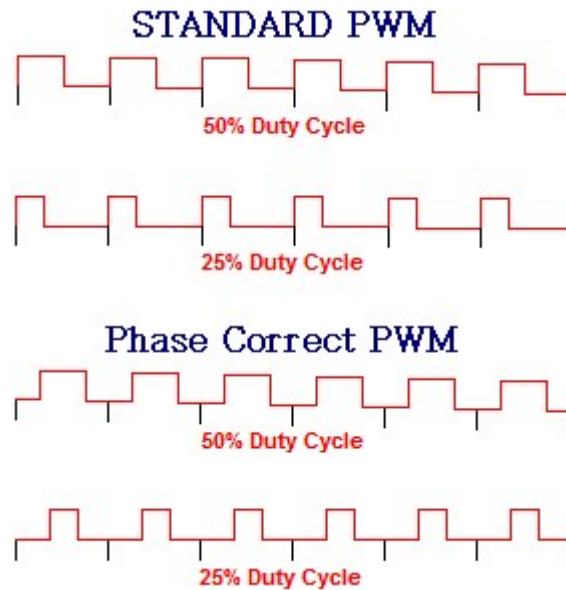
$$\text{Hall dekadicky} = \text{Hall A} \cdot 2^2 + \text{Hall B} \cdot 2^1 + \text{Hall C} \cdot 2^0$$

V druhém sektoru tabulky je uvedeno, zda fáze musí být připojena ke kladnému pólu baterie, k zápornému nebo zůstat volná. Třetí sektory tabulky zachycuje část pravdivostní tabulky určující, jaké signály na výstupu z Arduina zajistí připojení požadované fáze. Poslední sektor tabulky ukazuje kombinaci signálů na výstupu z Arduina pro připojení daných fází podle druhého sektoru tabulky. Podle čtvrtého sektoru je napsána funkce komutace (sektory jsou odděleny dvojitou čarou).

Pomocí switch case jsem pro každé dekadické vyjádření kombinace hallových senzorů naprogramoval výstupy podle posledního sektoru tabulky. Modré zvýraznění označuje PWM.

### 8.2 Nastavení PWM

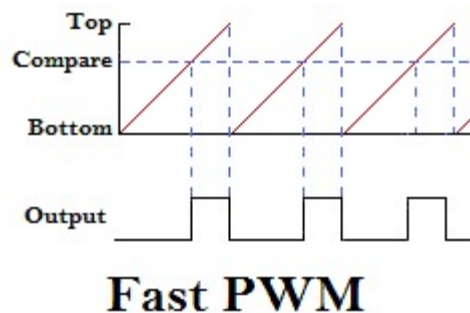
Arduino Micro nabízí dva režimy PWM – režim Fast PWM a režim Phase Correct PWM. Režim Fast PWM nabízí dvojnásobnou maximální frekvenci oproti režimu druhému, nicméně při změně střídání dochází k fázovému posunu signálu. Na obrázku 28 je znázorněn rozdíl mezi oběma režimy. V režimu Fast PWM je signál vždy zarovnán k začátku periody, v režimu Phase Correct je signál zarovnán do středu periody a se změnou střídání zůstává zachována fáze signálu. Tyto informace jsou z datasheetu Atmel32u4 [25].



obrázek 31 [26]

### 8.2.1 Fast PWM

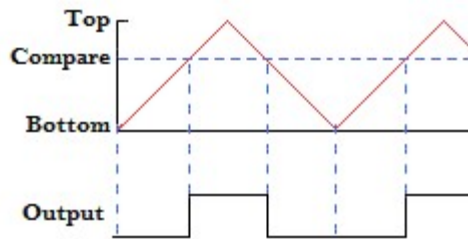
Využívá se tam, kde je potřebná rychlá reakce na změnu střídavé fáze signálu nehraje tak významnou roli. Časovač v tomto režimu čítá od nejnižší hodnoty k nejvyšší, konstantní hodnotě, která je dána bitovou šířkou čítače. Jakmile čítač dosáhne nejvyšší hodnoty, skokově se čítač vrátí k nejnižší hodnotě a čítá od nuly. Ve chvíli, kdy čítač narazí na porovnávací hodnotu, je výstup odpovídajícího pinu nastaven na úroveň log 1, při dosažení nejvyšší hodnoty je výstup nastaven do log 0. Změnou porovnávací hodnoty zůstává konstantní frekvence a mění se střída.



obrázek 32 [26]

### 8.2.2 Phase correct PWM

Tento režim je používám v aplikacích, kde je i při změně střídavé fáze nutné zachovat fázi signálu. Příkladem je právě řízení motorů. V tomto režimu je nejvyšší hodnota, určena bitovou šířkou čítače, zarovnána nikoli nakonec periody, ale do jejího středu. Čítač čítá od nejnižší hodnoty do nejvyšší, a poté čítá zpět do nejnižší hodnoty. Ve chvíli, kdy dojde k protnutí s porovnávací hodnotou je výstupní pin nastaven do log 1 a při čítání směrem dolů se při opětovném protnutí signál nastaví do log 0.



## Phase Correct PWM

obrázek 33 [26]

Pro řízení motoru jsem zvolil režim Phase Correct 8-bit. Předděličku jsem nastavil na 1, čítat čítá přímo hodiny procesoru. Podle výše uvedeného je frekvence v režimu Phase Correct poloviční, proto je frekvence na výstupu z Arduina 31 250 Hz, nikoliv očekávaných 62 500 Hz. Frekvence je přesto mimo pásmo slyšitelnosti a pro nabíjení bootstrap kondenzátoru dostačující.

### 8.3 Vstup z Hallových senzorů

Vstup signálu do Arudina za RC filtrem a Schmittovým klopným obvodem je na napěťové úrovni 5 V. Jak již bylo výše uvedeno, senzory jsou přivedeny na vstupy s bitovou váhou 0, 1 a 2. Stav pinů čtu příkazem PINx s maskováním ostatních bitů. Výsledkem je dekadické číslo od 1 – 6. Naprogramoval jsem funkci switch case, kdy každé hodnotě z hallových senzorů je přiřazen case, který obsahuje nastavení pinů podle čtvrtého sektoru tabulky 22.

Senzory jsou přivedeny na piny 2, 3 a 7, které podporují externí přerušení. Přerušení jsem nastavil tak, aby rutina byla obsloužena při každé změně stavu na pinu. V rutíně dojde jako první k přečtení stavu senzorů a poté program vstoupí do funkce switch case. Proběhne změna pinů a program se vrátí na místo, kde se nacházel před obslužením rutiny přerušení. Protože nebylo možné použít piny s váhou 0, 1 a 2, musel jsem v rutíně použít navíc podmíněný if, aby bylo možné správně spočítat hodnotu pro switch case.

V případě načtení neplatné hodnoty hallových senzorů dojde k blokaci všech tranzistorů.

### 8.4 Měření proudu

Arduino vyhodnocuje signál o napětí 5 V jako hodnotu 1023. Při průchodu proudu 83 A shunt rezistorem a nastavení zesílení 200 V / V by bylo napětí na výstupu měřiče 5 V. Výrobce udává maximální proud motorem 60 A, tomu odpovídá 3,6 V na výstupu z měřiče. Hodnotu signálu v rozmezí 0 – 1023 z měřiče si ukládám do proměnné. Poměr mezi maximální hodnotou z analogového pinu a známém proudu při této hodnotě je 83/1023. Tímto číslem vynásobím hodnotu uloženou v proměnné proudu a tím získám skutečný proud tekoucí obvodem. Pokud proud vzroste nad hodnotu 60 A, je zavolána funkce volnobeh(), která zablokuje všechny tranzistory, dokud proud nepoklesne.

### 8.5 Měření napětí

Napětí akumulátoru měřím na děliči napětí. Při maximálním napětí 33,6 V je na výstupu z děliče napětí 4,75 V. Pokud dosáhne napětí akumulátoru úrovně nižší než 28 V, je aktivována funkce volnoběh() a longboard není dále možné používat. Při dalším vybíjení by mohlo dojít k poškození baterii.

Při napětí 28 V je do ovladače posílám signál pro rozsvícení jedné LED diody, každý další volt až do 33 V posílá signál pro rozsvícení další LED diody. Tímto způsobem monitoruju napětí na ovladači.

## 8.6 Měření otáček

Na rozdíl od měření proudu, je měření otáček nepodstatnou částí programu. V této verzi longboardu je možné použít tuto funkci jen při připojení k počítači pomocí USB a tisku na sériový monitor. V další verzi plánuji instalaci displeje na longboard, kde bude rychlost zobrazována. Případně posílání této informace bezdrátově do ovladače.

K měření otáček jsem použil čítač 3 s předděličkou 64. V tomto režimu je doba jednoho tiků (perioda) 4 us. Do komutační tabulky jsem ke kroku s Hallovou kombinací 6 připsal řádek kódu pro uložení aktuální hodnoty čítače, uložení předchozí hodnoty do pomocné proměnné a nastavení hodnoty pomocné typu boolean na true. Ve smyčce programu, pokud hodnota boolean je true, dojde k výpočtu uplynulého času od minulého komutačního kroku 6. Tím získám periodu elektrické otáčky. Protože je stroj šesti pólový, je perioda mechanické otáčky šestinasobná.

Výpočet otáček jsem odvodil ze vztahu pro otáčky synchronního stroje:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{60}{T \cdot p} = \frac{60}{6 \cdot T} = \frac{10}{T}$$

Pro odstranění náhodné chyby měření otáček průměruju otáčky za 20 cyklů a teprve poté s nimi dále pracuju.

## 8.7 Bezdrátová komunikace

Funkce readByte() a writeByte() slouží k bezdrátové komunikaci prostřednictvím RF modulů.

### 8.7.1 Funkce vysílání – writeByte()

Vstupní parametr funkce je byte (0 – 255) k odeslání, funkce nemá návratovou hodnotu, je typu void. Aby bylo možné na straně přijímače ověřit správnost poslaného čísla, udělal jsem proměnnou checksum. Do proměnné je uložena negace hodnoty posílané hodnoty.

Následuje odeslání čísla 1, které synchronizuje přijímače a vysílače. Hodnotu posílám vždy v packetu o čtyřech bytech. První je odesláno pole velikosti dva byty – jeden byte určuje začátek packetu a druhý byte uvádí adresu komunikace. Na ESC longboardu budou dva moduly RF, adresa komunikace kanálů je v tomto případě nezbytná. Třetí byte je požadovaná hodnota k odeslání. Poslední kontrolní byte checksum

### 8.7.2 Funkce příjem – readByte()

Dvou bytové pole s kontrolním bytem a bytem adresy musí být v programu přijímače nadefinováno, stejně jako u vysílače. Pokud je v bufferu sériové komunikace packet odpovídající velikosti, program vstoupí do while smyčky. Dokud je buffer prázdný, program čeká na přijetí hodnot. Pokud však čekání na hodnotu trvá déle než 1 sekundu, je funkce ukončena a vrátí hodnotu 11. Hodnota 11 je bezpečnostním prvkem, v případě selhání komunikace dojde k nastavení nejnižší rychlosti motoru.

V případě naplnění bufferu dojde k uložení hodnoty do pomocné proměnné a ta je dále porovnávána s polem kontrolního bytu a bytu adresy. Při shodě prvního bytu packetu s kontrolním polem dojde k iteraci proměnné pos, určující, který prvek pole je porovnáván. Při shodě dalšího bytu (adresního), pokračuje program v čtení odeslané požadované hodnoty. Po uložení hodnoty je přijata ještě kontrolní hodnota checksum. V případě shody vrátí funkce načtenou hodnotu, a ta je uložena do proměnné pro další zpracování v programu. Pokud nedojde ke shodě, funkce proběhne od začátku.

Hodnota checksum je negací požadované hodnoty střídý. Na straně přijímače je kontrola provedena bitovou funkcí XOR žádané hodnoty a hodnoty checksum. Pokud je výsledek 255, binárně samé 1, byl přenos úspěšný. Pokud ne, poběží čtení znovu.

Funkce čtení posílané hodnoty je pomalá. Komutace je však řízená externími přerušeními s velmi vysokou prioritou, a tím pádem nedochází k ovlivnění komutace funkcí čtení.

### 8.7.3 Ovládání

Ovladačem je řízená rychlost longboardu, spuštění a zastavení motoru. Zastavení motoru znamená zablokování všech tranzistorů a zakázání externích přerušení, motor je v režimu volnoběhu. Spuštění povolí externí přerušení z hallových senzorů. Protože se motor může, ale nemusí točit, je nutné zadat příkaz pro vstoupení do obsluhy rutiny komutace.

Při zmáčknutí tlačítka na ovladači dojde k připojení pinu spuštění/zastavení motoru přes rezistoru na napětí 5 V. K filtraci zákmitu tlačítka jsem využil čítač 1 nastavený s předděličkou 64. Čítač je nastaven do režimu CTC (clear on compare match). Po zmáčknutí tlačítka dojde k vynulování čítače a nastavení boolean debounce\_bool na hodnotu true. Vstup do podmínky if při zmáčknutí tlačítka je podmíněn hodnotou false v daném boolean operátoru. Čítač čítá do 50000, poté dojde k vyvolání rutiny přerušení, kde dojde k nastavení hodnoty operátoru na true a tlačítko je tak připraveno k použití. Hodnota čítače 50 000 s nastavenou předděličkou 64 odpovídá 0,2 sekundám.

Výchozí nastavení ovladače po zapnutí nebo po resetu je zastavení motoru. První zmáčknutí tlačítka vyšle signál pro zapnutí a opětovné zmáčknutí motor vypne.

#### 8.7.3.1 Rychlost, spuštění a zastavení

Rychlost motoru, která se nastavuje potenciometrem na ovladači, je nastavitelná v rozmezí 5 – 250 (střída). Při nastavení střídy menší než 5 se motor neotáčí plynule. Na druhou stranu nesmí být hodnota střídy nastavena na 100%, protože je nutné zajistit cyklické nabíjení bootstrap kondenzátoru. Pokud by byla nastavena střída 100%, kondenzátor by se po čase vybil a nedokázal by udržet gate v plně otevřeném stavu, čímž by došlo buď k jeho úplnému nebo částečnému zavření. Částečné zavření by způsobilo prudký nárůst odporu vodivého kanálu a přehřátí.

Hodnoty 0 – 5 jsem využil pro posílání informace o stavu tlačítka a adresy vysílání. Hodnota 2 spustí motoru, hodnota 4 motor zastaví, hodnota 3 je adresa vysílání z ovladače do motoru. Hodnota rychlost je posílána neustále, pokud dojde ke změně stavu tlačítka, pošle se místo rychlosti hodnota pro spuštění nebo zastavení motoru. Přijímač ESC zpracuje přijaté informace a vstoupí do funkce START() nebo volnobeh (), která motor zastaví.

Na začátku nekonečné smyčky programu je do proměnné pom uložen rozdíl aktuální hodnoty časovače 3 a času poslední komutace. Po spuštění systému, dokud neproběhl žádný komutační cyklus, odpovídá tato hodnota hodnotě čítače. Po komutaci odpovídá skutečnému rozdílu časů. Je-li čas od poslední komutace větší než 0,2 sekundy, proběhne zavolání funkce netoci (). Při běhu motoru je maximální čas mezi komutačními kroky, tzn. při nejmenší rychlosti, roven 0,16 s. Proto je podmínka platná jen v případě, že motor neběží.

Funkce netoci () přečte kombinaci Hallových senzorů a poté hodnotu porovná s polem, které obsahuje komutační kroky v pořadí točení ve správném směru. Jakmile dojde ke shodě, je uložena pozice hodnoty v poli, nikoli hodnota kombinace. Jednou proběhne komutační funkce, poté program vstoupí do for cyklu, kde je pozice v poli inkrementována a pro každou pozici zavolána funkce komutace. Na konec for cyklu je vloženo zpoždění 5 ms, jinak by komutace probíhala nadměrně rychle a motor by se neroztočil. Experimentálně jsem zjistil, že 3 komutační kroky jsou pro spolehlivé roztočení motoru dostačující.

#### START()

Funkce obsahuje příkazy pro vstoupení do dvou funkcí. První je zpracována funkce povoleni\_exint (), která povolí externí přerušení. Následně proběhne realizace funkce KOMUTACE (). Pouhým zavoláním funkce KOMUTACE () se motor sám neroztočí. Jeden komutační krok, který proběhne při zavolání funkce motor nepootočí dostatečně, aby došlo ke změně stavu Hallových senzorů. Není tak vyvoláno externí přerušení a motor zůstane stát. Roztočení zajistí funkce netoci ().

#### volnoběh()

Zavolání této funkce zajistí blokaci všech tranzistorů nastavením signálů z Arduina pro piny PWM 1 – 3 do 0 a signálů KOM 1 – 3 do logické jedničky. Nastavení vyplývá z logiky řízení, popsané výše.

#### 8.7.4 PWM Rampa

Nárůst napětí na motoru musí probíhat po rampě s určeným krokem, jinak by při prudké změně střídý mohlo dojít k nebezpečnému nárůstu proudu. Rampu jsem realizoval v ovladači, hodnota, kterou posílám do ESC je již se stoupáním po rampě. Změna střídý po rampě probíhá pouze při zvětšení střídý. Pro měření času jsem využil integrovanou funkci měření času millis () v milisekundách. Hodnota z potenciometru je každý cyklus načtena a uložena do proměnné pRychlost, následně je přepočtena na hodnotu v rozmezí 6 – 250 a uložena do proměnné pRychlost. Následuje funkce rampy. Pro vstup do funkce musí být čas od posledního vstupu větší než nastavitelný schod rampy. Při prvním cyklu programu je podmínka vždy splněna, na konci funkce je uložen aktuální čas a v dalších cyklech je splněna podmínka až po uplynutí nastavené doby.

Pokud je rychlost v proměnné pRychlost větší než aktuální odesílaná rychlost mRychlost, dojde k inkrementaci proměnné mRychlost o 1. Pokud je mRychlost rovna pRychlost, do proměnné rychlost je uložena předchozí hodnota proměnné mRychlost.

Schod rampy je nastavitelný změnou hodnoty v proměnné rampa. Výchozí nastavení rampy je 40 ms.

##### 8.7.4.1 Napětí akumulátoru

Komunikace opačným směrem, tj. ESC → Ovladač je zajištěna druhým RF modulem s jinou hodnotu adresního bytu. Podle stavu napětí akumulátoru je do proměnné pocet\_LED uloženo číslo 1 – 6. Při nejnižším možném napětí 27 V, je hodnota 1, pro maximální napětí hodnota 6. Po přijetí ovladač hodnotu uloží do proměnné se stejným názvem. Tato hodnota je řídicí hodnotou switch case funkce, kdy je podle hodnoty čísla rozsvícen odpovídající počet LED diod.

LED diody by při nepřetržitém svícení značně zvýšili spotřebu energie ovladače, a bylo by nutné často měnit baterie. Z tohoto důvodu jsem do obvodu zařadil další tlačítko, po jehož zmáčknutí se rozsvítí diody indukující stav baterie. Pokud tlačítko nebude zmáčknuté, diody nebudou svítit a spotřeba obvodu bude přibližně 50 mA. Podle datasheetu spotřeba Arduina činí 19 mA, spotřeba vysílače je v rozmezí 9 – 40 mA a spotřeba přijímacího modulu je < 6 mA. Pokud by LED diody permanentně svítily, spotřeba obvodu by vzrostla o přibližně 250 mA.

Informace o stavu baterie bude zobrazována pouze při zmáčknutí odpovídajícího tlačítka. Program tak není každý cyklus zpomalován posíláním informací o stavu. Po zmáčknutí tlačítka nejprve pošle ovladač informaci procesoru ESC, který v reakci na tuto událost začne posílat informaci o stavu baterie. Dokud je tlačítko zmáčknuto, probíhá odesílání.

Znalost hodnoty proudu při běžném používání není potřebná, přesto považuju upozornění na nebezpečně vysokou hodnotu proudu obvodem za vhodný varovný prvek. Pokud proud obvodem vzroste nad 45 A, rozsvítí se na ovladači varovná LED dioda.



## 9. Realizace

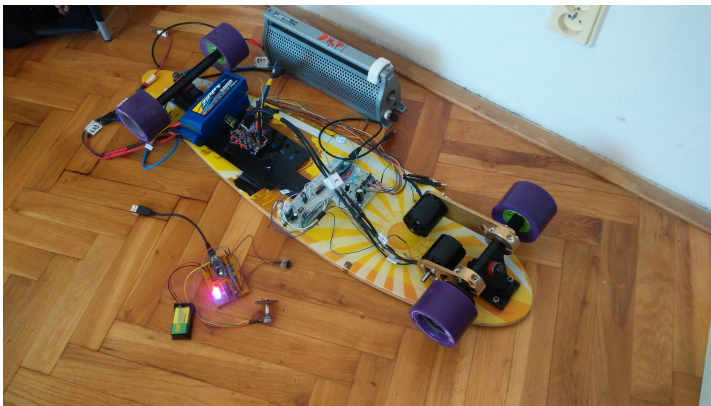
Podle schématu uvedeného v příloze 1 jsem provedl zapojení obvodu na nepájivém poli. Chladič MOSFET tranzistorů je hliníkový polotovar, k němuž jsou přes izolační podložky přimontované tranzistory. Na nepájivém poli jsem měření proudu realizoval za zátěží. Měřicí odpor je měděné pásky. Při průchodu proudu 10 A byl úbytek napětí přibližně 30 mV.

Hallovy senzory z motoru byly vyvedeny na konektor, jehož protikus nebylo možné opatřit. Proto byl konektor odštípnut a místo něj připájeny delší vodiče, které jsem do nepájivého pole vkládal. Obvod nebyl napájen z akumulátoru, dokud vše nebylo správně nakonfigurováno a otestováno. Budiče a zpočátku i H-most byl napájen ze zdroje 15 V s proudovým omezením 3 A. Toto omezení proudu bylo mnohokrát záchrannou brzdou celého obvodu.

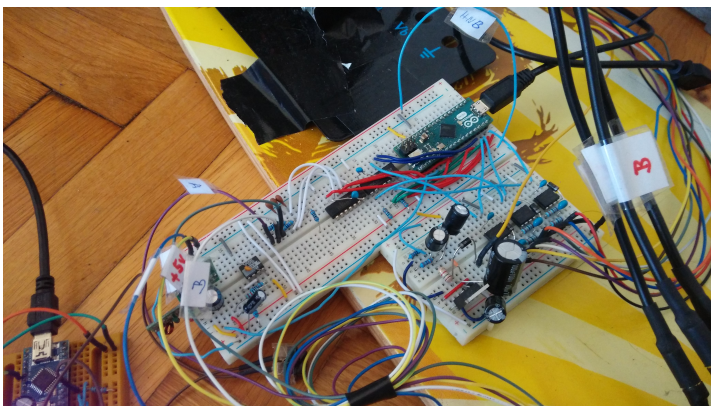
Jakmile motor při tomto napětí běžel s malým proudem, byl zdroj s omezením proudu 3 A nahrazen zdrojem s omezením 30 A a napětím 30 V. Budič byl stále napájen z 15 V zdroje, stejně jako tomu je v konečné verzi.

Během ladění byl spáleno 5 budičů a 3 tranzistory. Testování maximálních otáček motoru s nedokonalým programem při 30 V vedlo ke spálení 3 horních tranzistorů. S největší pravděpodobností program nestíhal správně komutovat a docházelo k indukci velkého napětí, které způsobilo průraz. Po této havárii byl mezi VCC a VS a VS a GND každého tranzistoru přidán low ESR kondenzátor s malým odporem v sérii. Dále na vstupu VCC\_D byl přidán low ESR kondenzátor o kapacitě 470 uF.

Na obrázcích 34 a 35 je konečná fáze prototypu longboardu a obvodu ESC.



obrázek 34

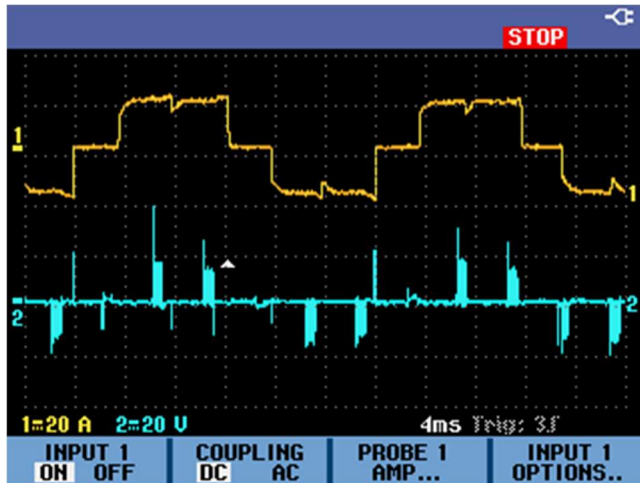


obrázek 35

## 9.1 Průběhy

Osciloskopem jsem sejmul průběhy napětí a proudů v důležitých bodech obvodu.

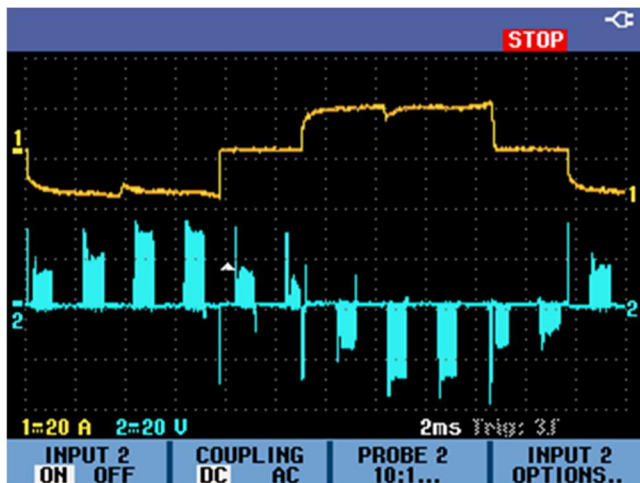
Na kanálu jedna je průběh proudu fáze C a na kanálu 2 napětí mezi fází C a uměle vytvořeným středem.



*průběh 1*

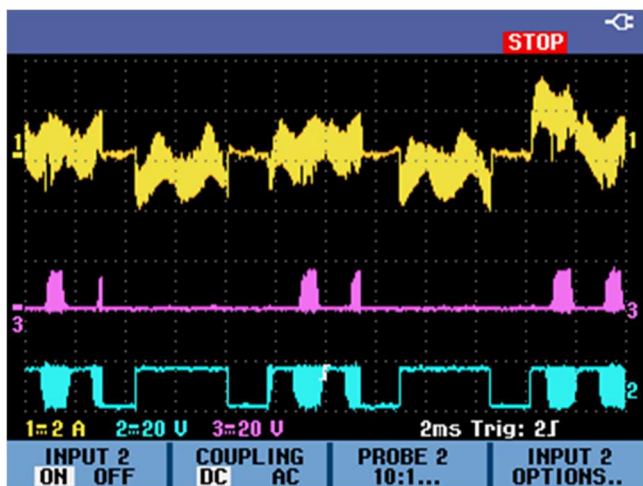
Napětí na kanálu dva nezobrazuje skutečný průběh, osciloskop špatně vykresluje. Průběh je sejmutý při zatíženém motoru. V první fázi je sledovaná fáze připojena přes dolní tranzistor k zemi, následuje blokáce obou tranzistorů a fáze je volná. V další fázi je fáze připojena přes horní tranzistor k napětí  $U_{CC}$ . V okamžiku komutace na jedné z dvou zbylých fází vzniká typický zákmit.

Na průběhu 2 je stejný průběh proudu jako na předchozím obrázku, napětí je sledováno mezi dvěma fázemi.



*průběh 2*

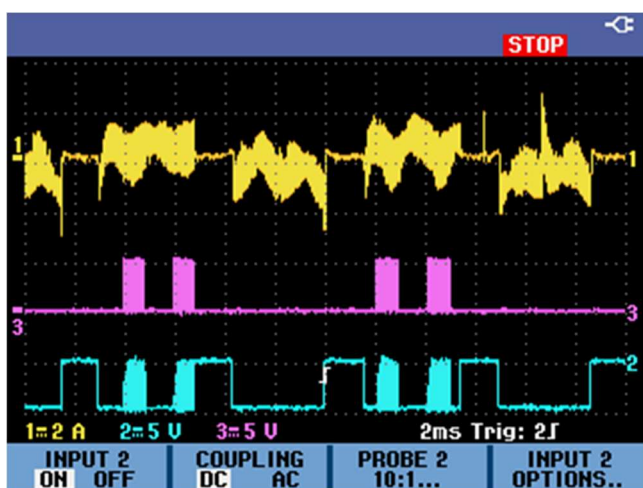
Na dalším průběhu je zachycen opět proud fází v menším měřítku. Kanál 2 a 3 zobrazuje průběh napětí na výstupu z budiče, respektive gate elektrodách. Kanál 2 odpovídá dolnímu gate dolního tranzistoru a kanál tři horního.



průběh 3

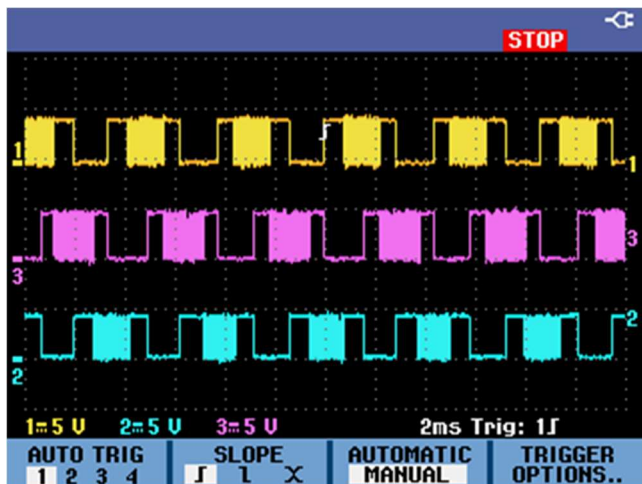
Chybou vykreslování osciloskopu se napětí jeví chybně, ve skutečnosti odpovídá průběh následujícímu průběhu 5. Úroveň signálu je 20 V, tím je zajištěno plné otevření tranzistorů. Napětí na horním tranzistoru je měřeno vůči  $V_S$ , napětí na dolní vůči zemi.

Průběh číslo zachycuje vstupní signály do budiče. Jak již bylo zmíněno, ne nepájivém poli jsme použil budiče IR2103 s invertujícím vstupem LIN. Porovnání s průběhem je jasně vidět inverzní signál na výstupu.



průběh 4

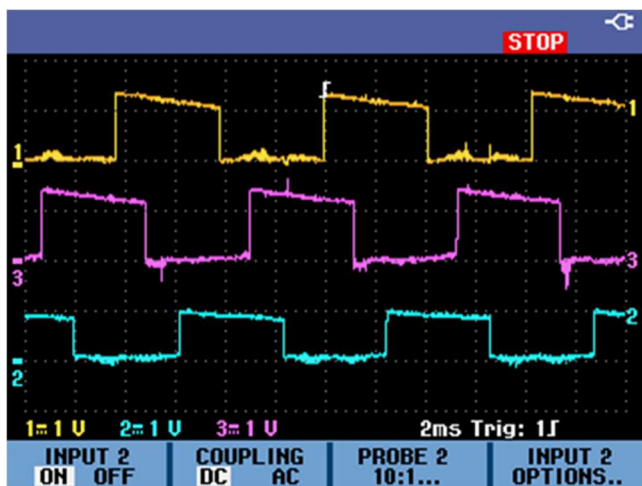
Průběh číslo zachycuje signály LIN A, B, C na vstupu do budičů a zobrazuje fázové posunutí.



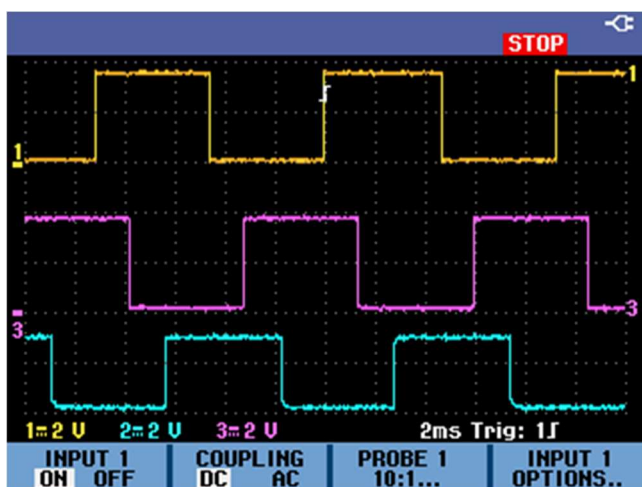
průběh 5

Je vidět 6 komutačních kroků, každý signál je dva kroky v režimu PWM, dva kroky na vysoké úrovni a dva kroky na nízké úrovni.

Dva následující průběhy zachycují výstup z Hallových senzorů. První průběh je výstup přímo z Hallových senzorů, druhý výstup je za RC filtrem a Schmittovým klopným obvodem.



průběh 6



průběh 7

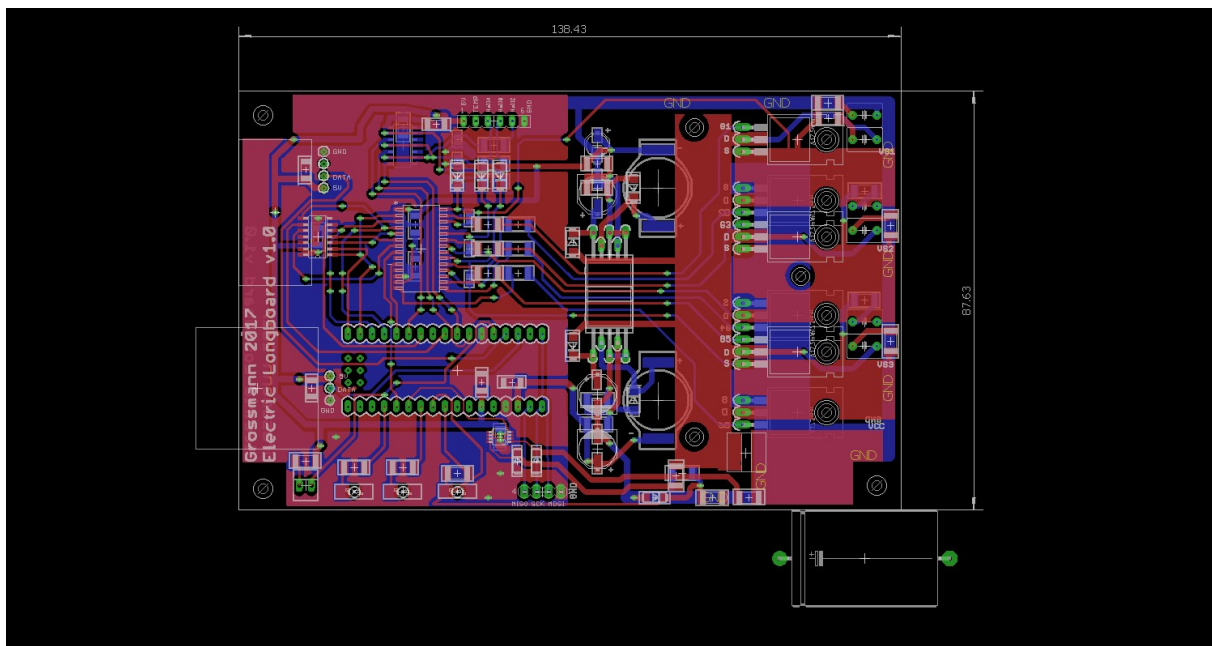


Úroveň signál na kanálu 3, ze senzoru fáze B je oproti fázi A a C asi o 1 V nižší. Signál je nižší už přímo na výstupu z Hallových senzorů, pravděpodobně je chyba v obvodu vestavných senzorů. Funkce senzoru je však neovlivněna, fázový posun je správný, a tak může tato chyba být zanedbána.

## 10. Návrh desky plošného spoje

Návrh jsem vytvářel ve studentské verzi programu Eagle 8.1.1. Nároky na rozměry plošného spoje nebyly výrazné, na prkně je dostatečný prostor. Z ekonomických důvodů jsem se přesto snažil vytvořit desku co nejmenší. Rozměry finální desky jsou 14 x 10 cm.

Všechny součástky mají na vstupu blokovací kondenzátor. Na vstupu akumulátoru je zařazen low ESR kondenzátor o hodnotě 470 uF. Výkonová a řídicí část je rozdělena a země jsou spojeny v jednom bodě. Tranzistory jsem vybral s vývodovým pouzdrům TO-220 AB. Tranzistory bude při provozu procházet proud až 60 A, který bude způsobovat zahřívání těchto součástek. Přibližný odhad jsem určil podle vztahu  $P = R \cdot I^2$ . Tento vztah nezahrnuje spínací ztráty, nicméně pro přibližný odhad je dostačující. Odpor vodivého kanálu při plném otevření tranzistoru je podle datasheetu 4,5 mΩ. Procházel-li by tranzistorem proud 60 A, ztráty na odporu by byly 16 W. SMD součástku by bylo velmi obtížné uchladiť. Pouzdro TO-220AB opatřené dírou pro přišroubování ke chladiči je z toho hlediska vhodnější. Na obrázku 31 je finální verze desky plošného spoje. V přílohách jsou potom zvlášť horní a dolní vodivá vrstva a vrstva rozmístění součástek.



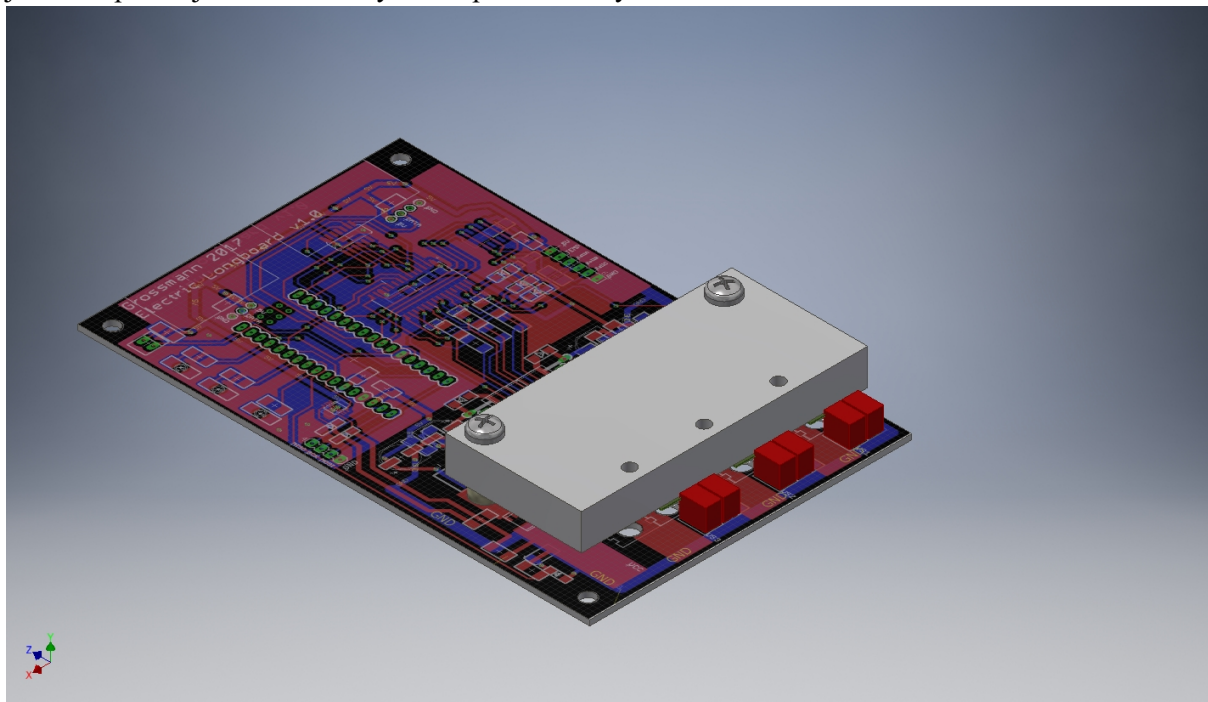
obrázek 36

### 10.1 Chladič

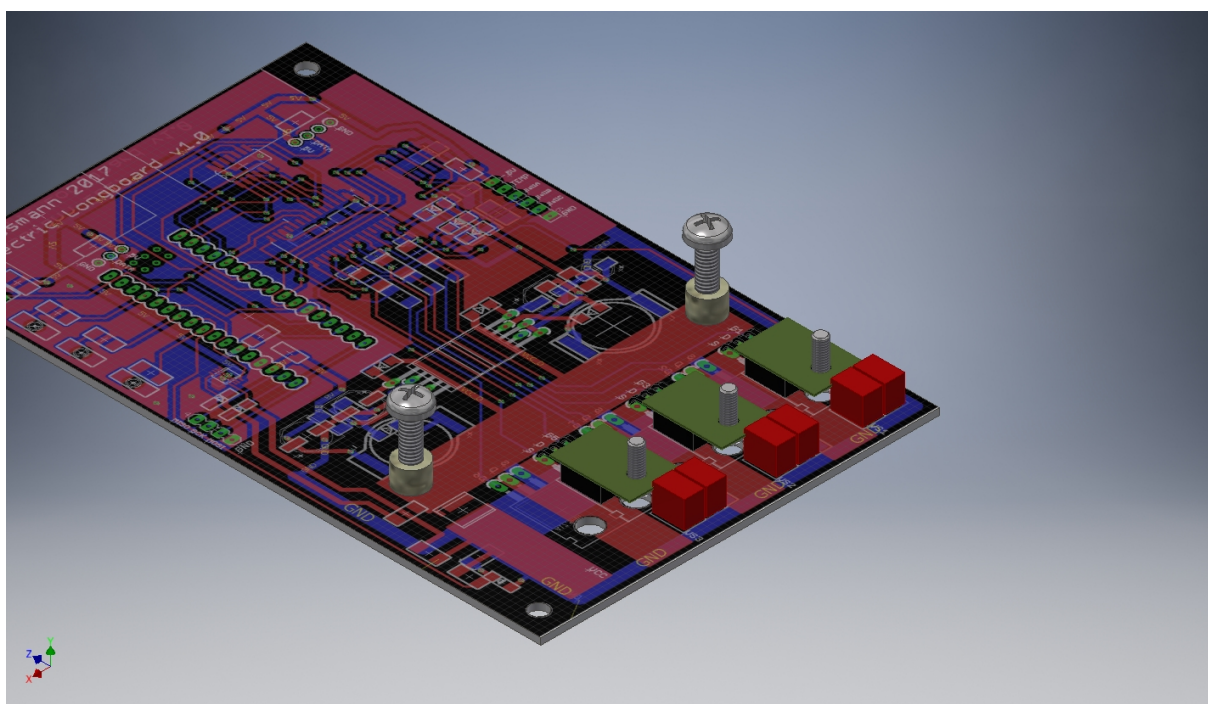
Tranzistory a ostatní součástky musely být umístěny tak, aby bylo možné tranzistory přimontovat k chladiči, aniž by bylo nutné jej podkládat. Situaci komplikují low ESR kondenzátory, jejichž výška je o několik mm větší než výška tranzistoru. Jelikož vývody kondenzátorů jsou krátké, není možné je natočit do jiné polohy. Z hlediska zjednodušení výroby bylo nutné, aby tvar chladiče byl jednoduchý obdélník.

Horní a dolní tranzistory jsem umístil na horní a dolní stranu desky zvlášť. Na obrázku 32 a 33 je model chladiče s tranzistory. Chladičem pro horní tranzistory vedou průchozí otvory pro šrouby, v chladiči dolních tranzistorů jsou závity. Pomocí tří šroubů budou navzájem spojeny chladiče i s deskou. Aby bylo možné po přimontování jednoho chladiče přišroubovat tranzistory na druhé straně,

jsou v odpovídajícím chladiči vyvrtané průchozí díry.



obrázek 37



obrázek 38

## 11. Ekonomická analýza

V poslední části práce se budu zabývat ekonomickou analýzou projektu. To znamená shrnutí finančních nákladů projektu a časové náročnosti. Následně porovnání nákladů výroby jednoho elektrického longboardu a velkovýroby, určení fixních a variabilních nákladů, výpočet minimální prodejní ceny výrobku pro dosažení zisku, sestavení rozvahy, určení výsledovky a cash flow dvou let provozu. Na závěr kapitoly zhodnotím, zda by založení firmy a investice do ní byly ekonomicky výhodné.

Byl bych jediným zaměstnancem firmy. Všechny potřebné díly a součásti bych si nechal vyrobit na zakázku nebo zakoupil již hotové výrobky. Návrh, programování a realizaci řídicí jednotky bych dělal sám.

### 11.1 Finanční náklady

Finanční náklady jsem rozdělil do tří následujících kategorií:

#### 11.1.1 Longboard

Zde zahrnuju položky týkající se pouze longboardu bez pohonu

- trucky
- kolečka

#### 11.1.2 Mechanická část pohonu

- mosazný polotovar
- soustružení mosazi
- řemenice
- řemen
- 3D tisk – podložky řemenice, ovladač

#### 11.1.3 Elektronická část pohonu

- elektronické součástky
- Arduino
- akumulátory
- nabíječ
- motory
- výroba desky plošného spoje

Longboard jsem vlastnil již před zahájením projektu. Nákupu položek v kategorii longboard proto nebylo podmínkou pro sestavení funkčního elektrického longboardu. Jak už jsem na začátku práce zmiňoval, v případě použití trucků, které na longboardu byly, by byla konstrukce svorky držáku motoru složitější. Problém původních koleček byl malý průměr. Hnaná řemenice by musela být značně menší a motor by byl zatížený větším momentem. Tyto důvody mně vedly k zakoupení nových dílů.

Ekonomickou analýzu provedu pro výrobu kompletu elektrického pohonu. Uvažuju výrobek sestávající z trucků, koleček, mechanické a elektrické části pohonu. Položky v kategorii longboard jsou tedy nedílnou součástí výrobku, a proto s nimi budu kalkulovat v nákladech.

Kontaktoval jsem výrobce trucků Caliber [27], koleček Orangatan [28], dodavatele hutního materiálu Feropol[29], výrobce řemenů a řemenic [30]3D tiskárnu 3D tisk Praha [31], dodavatele akumulátorů Hobbyking[32], motorů Alien Power Systems [33], výrobu plošných spojů Pragoboard [34] a firmu specializující se na soustružení a frézování Kovokoukola [35] ohledně ceny za jejich výrobky či služby při nákupu materiálu či výrobků pro vyrobení 100 ks longboardů. Všichni byli velice ochotní a vytvořili mně cenovou nabídku při objednání daného množství. V tabulce 23 uvádím ceny výroby při

množství 100 ks na rok na základě kalkulací od výše zmíněných společností. Cena elektronických součástek byla určena podle cen daných součástek při objednávání velkého množství, která je uvedena přímo na stránkách mouser.com u každého výrobku.

V následující tabulce jsou uvedeny ceny jednotlivých položek při výrobě jednoho a sta výrobků.

	objednání množství pro výrobu 1 výrobku		objednání množství pro výrobu 1000 výrobků	
	jednicová* cena v Kč	cena na 1 výrobek v Kč	jednicová* cena v Kč	cena na 1 výrobek v Kč
<b>Longboard</b>				
trucky	1860	1860	1300	1300
kolečka	1850	1850	1295	1295
<b>Mechanická část pohonu</b>				
mosazný polotovar /ocelový t = 15	1651*	165**	136,3*	**13,63
mosazný polotovar /ocelový t = 5	547,9*	164**	44,25*	**13,275
soustružení mosazi	400	400	2000	
řemenice hnací	39	78	39	78
řemencie hnaná	125	250	125	250
řemen krátký	150	150	150	150
řemen dlouhý	205	205	205	205
soustružení řemenice	300	600	200	400
3D tisk - podložky řemenice a ovladač	0	0	80	160
<b>Elektronická část pohonu</b>				
elektronické součástky	2000	2000	-	400
Arduino	500	500	-	-
akumulátory	1750	3500	1400	2800
nabíječ	2500	2500	-	-
motory	1700	3400	1300	2600
výroba desky plošného spoje	1000	2000	250	500
<b>celkem</b>		<b>19 622</b>		<b>10 162</b>

\*jednice = 1 m

\*\*na jeden výrobek bylo použito 100 mm polotvaru tloušťky 15 mm a 300 mm polotvaru tloušťky 5 mm

tabulka 23



Materiál použitý pro výrobku svorky v prototypu jsem volil mosaz. Důvodem volby mosazi byla její měkkost a tím jednodušší opracování. Obrobení dílů jsem plánoval dělat manuálně, obtížnost obrobení tudíž byla rozhodující. Nakonec jsem polotovary nechal obrobit na CNC stroji, a tím jediný důvod volby tohoto materiálu odpadl. Při výrobě ve velkém množství by byla použita ocel, která je levnější. Proto v kalkulaci výroby sta výrobků je použita cena oceli.

Předpokládám následující podmínky:

- jsem jediný zaměstnanec
- sídlo firmy v místě bydliště
- skladové prostory jsou také v místě bydliště
- vybavení – počítač, osciloskop
- výroba potřebných dílů externě, na zakázku

#### 11.1.4 Fixní náklady

Za výše uvedených podmínek jsou fixní náklady minimalizované. Zahrnují pouze náklady na pořízení potřebného software. Tím je Autodesk Inventor a Autodesk Eagle, jelikož použití studentské verze obou programů je omezena pouze pro výukové účely. Pořizovací cena licence pro Autodesk Inventor aktuálně činí 111 240 Kč na dva roky. Licenci pro Autodesk Eagle v plné verzi lze pořídit za 5 769 Kč.

Celkové fixní náklady na jeden rok činí 117 009 Kč.

#### 11.1.5 Variabilní náklady

Objem variabilních nákladů je přímo spojen s objemem výroby. V mém případě se zde řadí všechny náklady uvedené v tabulce výše. Výsledná hodnota variabilních nákladů na jeden výrobek činí 10 162 Kč.

#### 11.1.6 Cena výrobku

Prodejní cenu výrobku s nulovým celkovým ziskem stanovím podle vztahu  $p = \frac{F}{q} + b$ ,

kde

p..... cena výrobku

F..... fixní náklady

b..... variabilní náklady na jeden výrobek

q..... množství výrobku

Výsledná minimální cena kompletního elektrického longboardu vychází na **11 332 Kč**. Před pokračováním ve výpočtu ceny i se započtením zisku, se budu věnovat časové náročnosti projektu a s tím spojeným opportunity costem.

#### 11.1.7 Časová náročnost

Předpokládám, že všechny vyrobené výrobky se prodají, a budu tedy tvrdit, že náklady na výrobu jsou pokryty. Podle času stráveného na výrobě prototypu longboardu se pokusím odhadnout strávený čas na výrobě 100 kusů.

##### 11.1.7.1 Návrh a realizace mechanické části

Budu pojednávat o návrhu držáků motorů, svorek k držákům, podložek řemenic a pouzdra ovladače, pouzdra akumulátoru a elektroniky. Během zimního semestru jsem návrhem včetně výpočtů strávil přibližně dva měsíce, denně průměrně 2,5 hodiny. Odhadem jsem na návrhu mechanické části strávil *150 hodin*.

Jedná se pouze o dva jednoduché držáky a svorku, může se proto zdát tolik hodin přehnané. Kromě výše zmíněných částí jsem modeloval také samotný longboard, kolečka a trucky. Výkresy daných dílů od výrobců nejsou zveřejněny. Musel jsem vše podrobně a přesně měřit, aby díly vyrobené na míru pasovali správně. Návrh podložek řemenic bylo kvůli jejich neobvyklým tvarům nejobtížnější.

### 11.1.7.2 Návrh a realizace elektronické části

Výběr součástek, výpočet jejich parametrů, vytvoření schématu a desky plošného spoje byla nejnáročnější část celého projektu. Během studia jsem se s navrhováním obvodu neseťkal, a tak jsem zpočátku mnoho času strávil učením se. Návrh plošného spoje jsem také dělal poprvé, a tak i to trvalo mnohem déle, než bude při příštích návrzích. Celkový strávený čas odhaduji na *100 hodin*.

Vytváření programu byl dlouhý proces, který stále dokončený není. Včetně Odhaduji také *100 hodin* práce.

Na elektronice je ještě v tuto chvíli mnoho práce, především na programu. Plošný spoj bude třeba už jen osadit.

Podle odhadu jsem strávil přibližně 450 hodin na výrobě. Nyní pro kompletaci longboardu zbývá přibližně 200 hodin práce. Výroba dalších kusů by byla časově značně méně náročná. Jednalo by se o drobné úpravy obvodu a programu, vyladění chyb a podobně.

V následující tabulce uvádím odhad času výroby každého dalšího longboardu.

Činnost	Čas v minutách
příprava prkna	20
montáž mechaniky	20
montáž krytu elektroniky	5
montáž elektroniky	5
testování, zabalení	10
<b>celkem</b>	<b>60</b>

tabulka 24

Pokud bych chtěl sestavit 100 longboardů sám, trvalo by to přibližně 100 hodin, tj. 50 dní po 2 hodinách práce.

### 11.1.8 Opportunity cost

Podle definice je opportunity cost v ekonomii hodnota nejhodnotnější činnosti (statku), které se musí ekonomický subjekt vzdát ve prospěch jiné činnosti (jiného statku).

Hodnota nejhodnotnější činnosti, které bych se musel vzdát ve prospěch longboardů je zaměstnání s ohodnocením 120 Kč na hodinu. Sestavení 100 kusů longboardu by trvalo asi 100 hodin, musel by získat z něj minimálně **12 000 Kč**.

### 11.1.9 Náklady na legislativu a reklamu

Vrátím se nyní k vypočítané minimální ceně longboardu 11 332 Kč. Do výpočtu jsem zahrnul pouze materiál a produkty potřebné k výrobě longboardu. Pokud bych však výrobek chtěl uvést na trh, musel bych nechat udělat prohlášení o shodě, musely by být provedeny zkoušky zařízení a vytvořen návod k použití.

*Prohlášení o shodě* je písemné ujištění výrobce nebo dovozce o tom, že výrobek splňuje požadavky technických předpisů platných v ČR a že byl dodržen stanovený postup při posouzení shody. Postup při posouzení shody stanoví zákon 22/1997 Sb. v platném znění a příslušná nařízení vlády (NV). NV

vztahující se k elektrickému longboardu je č. 70/2002 Sb., o technických požadavcích na zařízení pro dopravu osob (2000/9/ES).

Jsem zaměstnancem firmy specializující se na bezpečnost strojů, prohlášení o shodě a návody k použití. Nechal jsem si udělat nabídku na longboard včetně nabíječe, a cena by byla 20 000 Kč.

Propagace výrobku je dalším kritickým faktorem. K propagaci bych využíval především sociální sítě, a navíc budu počítat s nákladem 10 000 Kč na jinou formu reklamy.

## 11.2 Rozvaha, výsledovka a cash flow

Sestavil jsem zakladatelskou rozvahu pro firmu s počátečním úvěrem 1 000 000 Kč.

Rozvaha 1. 1. 2018			
Aktiva		Pasiva	
software	117	základní jmění	100
vybavení	20	úvěr	1000
učet	963		
<b>aktiva celkem</b>	<b>1100</b>	<b>pasiva celkem</b>	<b>1100</b>

tabulka 25

Softwarem jsem se zabýval v kapitole 11.1.2. Položka vybavení představuje osciloskop, který je nutnou výbavou pro ladění obvodů. Za 20 000 Kč pořídím použitý osciloskop dostačující kvality. Základní jmění firmy jsem stanovil na 100 000 Kč. Úvěr je nebankovní. Půjčku mně nabídnul známý, který podporuje start-up projekty. Úroková sazba půjčky nulová.

Výsledovka a cash flow roku 2018 a 2019:

Výsledovka		
rok	2018	2019
tržby	1400	1400
náklady na materiál	-1050	-1050
náklady na prohlášení	-20	
odpisy	-30	-30
<b>provozní hosp. výsledek</b>	<b>300</b>	<b>320</b>
placené úroky	0	0
<b>hosp. výsledek z fin. operací</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>EBT</b>	<b>300</b>	<b>320</b>
daň	57	60,8
<b>EAT</b>	<b>243</b>	<b>259,2</b>

tabulka 26

<b>Cash Flow</b>		
	<b>31.12.2018</b>	<b>31.12.2019</b>
<b>počáteční stav</b>	<b>963</b>	<b>1053</b>
<b>EAT</b>	<b>243</b>	<b>259,2</b>
odpisy	30	30
závazky vůči státu (v 2019 zapláceno za 2018)	57	-57
závazek v.s. (daň z 2019 zaplatíme 2020)	-	60,8
<b>CF z provozní činnosti</b>	<b>330</b>	<b>293</b>
<b>CF z inv. činnosti</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
úmor	-240	-240
<b>CF z fin. činnosti</b>	<b>-240</b>	<b>-240</b>
<b>Čisté zvýšení pen. prostředků</b>	<b>90</b>	<b>53</b>
<b>konečný stav</b>	<b>1053</b>	<b>1106</b>

tabulka 27

A konečná rozvaha na konci roku 2018 a 2019.

<b>Konečná rozvaha 31. 12. 2018</b>			
<b>Aktiva</b>		<b>Pasiva</b>	
software	117	základní jmění	100
vybavení	20	úvěr	760
účet	1053	hospodářský výsledek	243
oprávky	-30	závazek vůči státu	57
<b>aktiva celkem</b>	<b>1160,00</b>	<b>pasiva celkem</b>	<b>1160,00</b>

tabulka 28

<b>Konečná rozvaha 31. 12. 2019</b>			
<b>Aktiva</b>		<b>Pasiva</b>	
software	117	základní jmění	100
vybavení	20	úvěr	520
účet	1106	hospodářský výsledek minulých let	243
oprávky	-60	hospodářský výsledek	259,2
		závazek vůči státu	60,8
<b>aktiva celkem</b>	<b>1183,00</b>	<b>pasiva celkem</b>	<b>1183,00</b>

tabulka 29

Počítal jsem s nákladem na výrobu jednoho longboardu 10 500 Kč. Vypočítaná hodnota byla 10 162 Kč, nicméně nepočítal jsem cenu balného a poštovného, které bych jako službu poskytoval. Proto jsem sumu zaokrouhlil na 10 500 Kč.

Podle konečné rozvahy po dvou letech fungování, a to za předpokladu stálých cen materiálu a výrobků pro výrobu longboardu, prodeje všech vyrobených kusů za rok při ceně 14 000 Kč/kus a nulovou investicí do reklamy, se aktiva zvýšila o 83 000 Kč. Stále zbývá doplatit 520 000 Kč úvěru a odložená platba daní ve výši 60 800 Kč v dalším roce. Analýzy dalších let jsem nedělal, protože bych přicházel o lepší příležitost zisku.

Šance na úspěch s takovou firmou je mizivá. Výrobci kvalitních elektro longboardů prodávají nejlevnější kusy od 15 000 Kč, a již kompletně sestavené s deskou, jejichž cena se pohybuje okolo dvou až třech tisíc korun. Parametry těchto nejlevnějších verzí longboardů, které velké společnosti nabízejí, jsou oproti *teoretickým* parametrům mého návrhu značně slabší, nicméně skutečné parametry mého longboardu nebyly prakticky ověřeny.

## 12. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval kompletním návrhem elektrického longboardu a ekonomickou analýzou projektu. Cílem mojí práce bylo postavit funkční longboard, který by dokázal konkurovat komerčně dostupným elektrickým longboardům, ale za podstatně menší cenu. Zkonstruovat funkční elektrický longboard se mně podařilo. Konkurence schopný však zatím rozhodně není. Elektronická stránka řízení je dokončena téměř kompletně. Řídicí program je ale stále velmi nedokonalý. Na prvním místě je zapotřebí doladit program tak, aby komutace probíhala vždy naprosto bez chybně. Poté by následovalo ošetření všech možných situací, přidání různých režimů jízdy, možnost připojení mobilu k longboardu a sledování statistik jízdy. Komerčně dostupné longboardy jsou opatřeny těmito funkcemi a dalšími.

Z ekonomické analýzy vyplývá, že by bylo možné produkt prodávat za cenu 14 000 Kč. Bylo by nutné nikoliv dorovnat se komerčně dostupným longboardům, ale vymyslet něco navíc, originálního a vsutku využitelného. Jedině tehdy by projekt mohl být ekonomicky výnosný.

Cíl práce jsem z jedné třetiny splnil, z jedné třetiny v následujících měsících splním a z jedné třetiny nesplnil. Nesplnil jsem požadavek vyrobit longboard za značně menší cenu oproti komerčně dostupným kvalitním longboardům. Již v tuto chvíli cena projektu přesáhla 20 000 Kč a předpokládám, že konečná cena se vyšplhá k 25 000 Kč.

Přínosem mojí práce je pohled do výrobního procesu elektrického longboardu a objasnění vysoké ceny kvalitních elektrických longboardů. Návrh, výroba a programování je časově neuvěřitelně náročná, a především nikdy nekončící práce. Vždy je možnost produkt zlepšovat.

Pro mě samotného byla práce neuvěřitelným přínosem. Poprvé jsem se setkal s návrhem obvodu, plošného spoje a programem pro řízení takového systému. Značně rozšířil svoje teoretické, ale především praktické schopnosti a poznal jsem, jak komplexní vědění je potřebné pro vytvoření spolehlivého produktu, a to mně bude motivací pro neustálé se zdokonalování.

Ke kompletaci longboardu je ještě zapotřebí osadit desku plošného spoje, naprogramovat vzájemnou komunikaci mezi Arduinem jednoho a druhého motoru, nechat vyrobit kryt na elektroniku a akumulátory vytvořit zajímavý design na spodní stranu desky.

Jistým zklamáním pro mě je fakt, že založení firmy pro výroby elektrických longboardů je i přes malé množství českých výrobců těžko uskutečnitelná, a především ekonomicky riziková. Tuto myšlenku však budu s dokončením a vylepšováním svého výrobku stále navštěvovat.

## 13. Bibliografie

- [ Segway [online]. b.r. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://cz-cs.segway.com/>  
1  
]
- [ Elektrické pohony a jejich řízení. 2016. Praha: ČVUT Praha, 2016. ISBN 9788001060070.  
2  
]
- [ Boosted. *Boostedboards* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <https://boostedboards.com/>  
3  
]
- [ Arduino [online]. b.r. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>  
4  
]
- [ Valivé tření (valivý odpor). *ConVERTER* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
5 <http://www.converter.cz/tabulky/valive-treni.htm>  
]
- [ Odporový vzorec. *Physics CUNI* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
6 [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/4\\_6](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6)  
]
- [ Těleso na nakloněné rovině. *Encyklopedie fyziky* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
7 <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1540-teleso-na-naklonene-rovine>  
]
- [ TYMA - řemenice. *TYMA* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
8 <https://www.tyma.cz/files/doc/zs-5m.pdf>  
]
- [ Alien Power Systems. *Alien Power Systems* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
9 <http://alienpowersystem.com/product-category/brushless-motors/50mm/>  
]
- [ Turnigy Graphene Professional 10000mAh 4S 15C LiPo Pack w/5.5mm Bullet Connector.  
1 *HobbyKing* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-0-graphene-10000mah-4s-15c-w-5-5mm-bullet-connector.html](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-0-graphene-10000mah-4s-15c-w-5-5mm-bullet-connector.html)  
0  
]
- [ Evolve. *Evolve Skateboards USA* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
1 <https://evolveskateboardsusa.com/>  
1  
]
- [ Magneto. *Magneto Electric Skateboard* [online]. b.r. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z:  
1 <https://magnetoelectricsskateboard.com/>  
1





[ N-channel MOSFET configured as low-side switch. In: *1.bp.blogspot.com* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://1.bp.blogspot.com/-2RjxKkks0kG0/USpZY8v50wI/AAAAAAAAAiE/BM3aMGKPhMo/s1600/fig1.png>

]

[ *HV Floating MOS-Gate Driver ICs* [online]. In: . Kansas St., El Segundo, California: IRF, 2007, s. 1-30 [cit. 2017-05-26].

3

]

[ REGAN, Tim, Jon MUNSON, Greg ZIMMER a Michael STOKOWSKI. *Current Sense Circuit Collection: Making Sense of Current* [online]. In: . Linear technology, 2005, s. 1-10 [cit. 2017-05-26].

]

[ *ATmega16U4/ATmega32U4* [online]. Atmel, 2016 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf)

5

]

[ Newbie's Guide to AVR PWM. In: *AVR Freaks* [online]. 2008 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.avrfreaks.net/forum/tut-c-newbies-guide-avr-pwm-incomplete?name=PNphpBB2&file=viewtopic&t=68302>

]

[ *Caliber* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://calibertruckco.com/>

2

7

]

[ *Orangatan wheels* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://orangatangwheels.com/kegel-280mm>

8

]

[ *Feropol* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.feropol.cz/>

2

9

]

[ *TYMA* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/>

3

0

]

[ *3D tisk The Bandit* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk-praha.cz/>

3

1

]

[ *Hobby King* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://hobbyking.com/>

3

2  
]

[ *Alien Power System* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://alienpowersystem.com/>  
3  
3  
]

[ *Pragoboard* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.pragoboard.cz/>  
3  
4  
]

[ *Kovokoukola* [online]. b.r. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.koukola.cz/>  
3  
5  
]