



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## REALIZACE ELEKTRICKÉHO POHONU UŽITKOVÉHO VOZÍKU

ELECTRIC DRIVE OF THE WHEELBARROW

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Lažek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Tomáš Lažek

**ID:** 173687

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Realizace elektrického pohonu užitkového vozíku**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Specifikujte parametry a konstrukci zástavby pohonu do vozíku.
2. Realizujte měnič pro zvolený typ elektrického motoru
3. Ověřte funkčnost realizovaného prototypu

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. odborné knihy. odborné knihy. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 31.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu ekonomického elektrického pohonu pro užitkový vozík. První část je věnována přehledu provozních vlastností dostupných elektromotorů, baterií a převodů vhodných pro konstrukci elektrického pohonu. V další části se práce zabývá návrhem a realizací pulsního měniče pro konkrétní stejnosměrný motor. Měniče bude řízen integrovaným obvodem UC3638.

## **Klíčová slova**

Integrovaný obvod UC3638, lithium-iontová baterie, pulsní měnič, stejnosměrný motor, užitkový vozík

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with proposal of an electrical low-cost drive for the wheelbarrow. The first part of thesis is devoted to overview of operational characteristics of available electric motors, batteries and gears suitable for the construction of an electric drive. In the next part the thesis deals with the design and implementation of a pulse converter for a specific DC motor. The converter will be controlled by the integrated circuit UC3638.

## **Keywords**

Integrated circuit UC3638, Lithium-ion battery, Pulse converter, DC motor, Wheelbarrow

## **Bibliografická citace:**

LAŽEK, T. *Realizace elektrického pohonu užitkového vozíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivo Pazdera, Ph.D..



## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Realizace elektrického pohonu užitkového vozíku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2017**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ivu Pazderovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....  
podpis autora

# Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod .....  | 1  |
| 2     | Typ vozíku .....  | 2  |
| 2.1   | Konstrukce vozíku.....  | 2  |
| 2.2   | Parametry vozíku .....  | 2  |
| 2.3   | Výhody a nevýhody elektrického pohonu.....                      | 2  |
| 2.4   | Výpočet potřebného výkonu motoru .....                          | 3  |
| 2.5   | Výpočet potřebného momentu.....                                 | 5  |
| 3     | Koncepce pohonu .....   | 6  |
| 3.1   | Požadavky na motor .....  | 6  |
| 3.1.1 | Střídavý asynchronní motor .....                                | 6  |
| 3.1.2 | Střídavý synchronní motor .....                                 | 7  |
| 3.1.3 | Stejnoseměrný motor .....                                       | 7  |
| 3.1.4 | Stejnoseměrný elektricky komutovaný motor .....                 | 8  |
| 3.1.5 | Srovnání motorů .....   | 8  |
| 3.1.6 | Výběr motoru.....   | 10 |
| 3.2   | Požadavky na baterii .....                                      | 12 |
| 3.2.1 | Olověné baterie.....  | 12 |
| 3.2.2 | Lithiové baterie.....   | 14 |
| 3.2.3 | Baterie na bázi niklu .....                                     | 16 |
| 3.2.4 | Srovnání baterií .....  | 18 |
| 3.2.5 | Výběr baterie .....   | 21 |
| 3.3   | Požadavky na přenos momentu na poháněné kolo.....               | 22 |
| 3.3.1 | Možnosti řešení přenosu momentu na poháněné kolo .....          | 22 |
| 4     | Konkrétní prvky pohonu .....                                    | 23 |
| 4.1   | Motor .....   | 23 |
| 4.1.1 | Stejnoseměrný motor typu MY1016Z .....                          | 23 |
| 4.2   | Baterie.....  | 24 |
| 4.2.1 | Lithium-iontová baterie 7S3P 18650 .....                        | 24 |
| 4.3   | Přenos momentu na poháněcí kolo .....                           | 25 |
| 4.3.1 | Výpočet parametrů ozubeného kola.....                           | 25 |
| 4.3.2 | Výpočet momentu přenášeného na poháněné kolo .....              | 26 |
| 5     | Regulátor motoru .....  | 27 |
| 5.1   | Čtyřkvadrantový tranzistorový pulsní měnič.....                 | 27 |
| 5.1.1 | Bipolární a unipolární řízení čtyřkvadrantového měniče.....     | 28 |
| 5.1.2 | Možnosti realizace řídicí logiky čtyřkvadrantového měniče ..... | 29 |
| 5.2   | Návrh výkonových prvků .....                                    | 30 |
| 5.2.1 | Parametry motoru .....  | 30 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.2.2 | Návrh parametrů tranzistorů.....                                | 30 |
| 5.2.3 | Návrh parametrů kondenzátorů.....                               | 34 |
| 5.3   | Návrh řídicího obvodu s integrovaným obvodem UC3638.....        | 34 |
| 5.3.1 | Vnitřní struktura UC3638.....                                   | 35 |
| 5.3.2 | Popis zapojení řídicího obvodu s integrovaným obvodem UC3638... | 37 |
| 5.4   | Realizace měniče.....   | 44 |
| 5.5   | Měření na zhotoveném měniči .....                               | 45 |
| 5.6   | Zhodnocení dosažených výsledků.....                             | 47 |
| 6     | Závěr.....  | 48 |
|       | Literatura .....  | 49 |
|       | Seznam symbolů, veličin a zkratk.....                           | 51 |
|       | Seznam příloh.....  | 54 |

# Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 2.1: Rozložení sil v nakloněné rovině [2] .....   | 3  |
| Obrázek 3.1: Koncepce pohonu .....  | 6  |
| Obrázek 3.2: Momentová charakteristika elektricky komutovaného motoru [5] .....   | 8  |
| Obrázek 3.3: Pohyb iontů lithia při nabíjení a vybíjení [10] .....  | 15 |
| Obrázek 4.1: Stejnoseměrný motor typu MY1016Z.....  | 23 |
| Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma čtyřkvadrantového měniče, převzato z [18] ..   | 27 |
| Obrázek 5.2: Průběh napětí na svorkách motoru $U_{AB}$ při bipolárním způsobu řízení .....  | 28 |
| Obrázek 5.3: Průběh napětí na svorkách motoru $U_{AB}$ při unipolárním způsobu řízení .....   | 29 |
| Obrázek 5.4: Tepelné schéma dvou aktivních tranzistorů na společném chladiči ..   | 33 |
| Obrázek 5.5: Vnitřní struktura obvodu UC3638, převzato z [20] .....   | 35 |
| Obrázek 5.6: Princip regulace střídy a význam napětí $U_{DB}$ , převzato z [20] a upraveno autorem .....  | 36 |
| Obrázek 5.7: Zapojení obvodu s integrovaným obvodem UC3638 .....  | 37 |
| Obrázek 5.8: Princip řízení čipu UC3638.....  | 41 |
| Obrázek 5.9: Budič horního výkonového tranzistoru.....  | 43 |
| Obrázek 5.10: Návrh DPS .....   | 44 |
| Obrázek 5.11: Prototyp zhotoveného měniče - pohled ze strany součástek .....  | 45 |
| Obrázek 5.12: Průběh řídicího napětí horních tranzistorů $U_{GH}$ (5V/dílek) a proudu $I_Z$ (500mA/dílek) při střídě menší než $s = 0,5$ a frekvenci $f_{PWM} = 20$ kHz.....  | 46 |
| Obrázek 5.13: Průběh řídicího napětí dolních tranzistorů $U_{GD}$ (5V/dílek) a proudu $I_Z$ (500mA/dílek) při střídě menší než $s = 0,5$ a frekvenci $f_{PWM} = 20$ kHz ..... | 46 |

# Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 2.1: Parametry vozíku pro výpočet výkonu a momentu [1] .....          | 2  |
| Tabulka 3.1: Porovnání některých parametrů vybraných elektrických motorů..... | 9  |
| Tabulka 3.2: Porovnání některých parametrů vybraných typů akumulátorů [13].   | 19 |
| Tabulka 4.1: Parametry motoru MY1016Z [14] .....                              | 24 |
| Tabulka 4.2: Parametry baterie 7S3P 18650 [16].....                           | 25 |
| Tabulka 5.1: Některé parametry stejnosměrného motoru .....                    | 30 |
| Tabulka 5.2: Parametry zvolených tranzistorů .....                            | 31 |
| Tabulka 5.3: Přehled ztrát tranzistorů.....                                   | 33 |

# 1 ÚVOD

Užitkové kolečko je dobrým pomocníkem při převážení materiálů. Myšlenka využití elektrického pohonu se jeví jako výhodná, jelikož usnadní obsluhu manipulaci a práci s kolečkem. Toto řešení má však své nevýhody v podobě zvýšení hmotnosti kolečka a také finanční náročnosti konstrukce. Kolečko s elektrickým pohonem je v současné době na trhu dostupné, ovšem za relativně vysokou cenu.

Práce se bude zabývat návrhem vhodného konceptu pohonu. Nicméně již na začátku práce lze tvrdit, že pohon se bude skládat z elektromotoru, baterie, regulátoru a zařízení pro přenos momentu na poháněné kolo. Tato práce si klade za cíl podrobně rozebrat veškeré možnosti, které nabízí trh k řešení levného a účinného pohonu.

V první části práce jsou specifikovány požadavky na pohon. Mezi nejdůležitější parametry patří rychlost jízdy, hmotnost samotného kolečka i se zátěží a maximální úhel nakloněné roviny při jízdě do kopce.

Druhá část se podrobně věnuje literární rešerši prvků elektrického pohonu. V první řadě se jedná o elektromotor. Zde jsou zdůrazněny především výhody a nevýhody jednotlivých typů elektromotorů. Taktéž je zde uveden podrobný přehled vlastností moderních akumulátorů vyskytujících se v dnešní době na trhu.

Třetí část práce je věnována konkrétním prvkům pohonu. Jedná se tedy o specifikaci a konkretizaci jednotlivých prvků, jako je elektromotor, baterie a zařízení pro přenos momentu na poháněné kolo.

Poslední část práce se detailně věnuje návrhu měniče pro elektromotor. Jsou zde rozebrány možnosti řízení měniče, ale také i realizace. Dále je zde podrobně rozebrán postup při návrhu výkonových součástí a zároveň i výpočet potřebného chladiče. Řízení měniče obstará speciální integrovaný obvod určený k řízení stejnosměrných motorů. Popsány jsou jednotlivé kroky při návrhu tohoto měniče a potřebné parametry. Nakonec je zde pojednáno o zkušenostech při realizaci prvního prototypu a jsou zde i představeny návrhy pro zlepšení konstrukce měniče.

## 2 TYP VOZÍKU

Jedná se o užitkové kolečko, které slouží k převážení materiálu na krátké vzdálenosti. Vyrábí se pro stavebnictví nebo pro zahradnictví. Ve stavebnictví mají velkou nosnost a malý objem, v zahradnictví naopak velký objem a menší nosnost. Disponují různými koly odpovídající určení. Jako pohon je využívána lidská síla, která zároveň kolečko řídí. Speciální typy koleček mohou být bez ložného kotle na převoz velkoplošných materiálů s malou hmotností.

### 2.1 Konstrukce vozíku

Kolečko se skládá ze tří komponentů, a to kotle, kola a řídítek. Kolo může být podle potřeby plné nebo s duší. Kotel bývá zpravidla kovový a slouží jako převozní plocha. Objem kotle závisí na použití kolečka. Ve stavebnictví, kde se převáží většinou stavební suť a jiné těžké materiály, bývá kotel vyroben ze silnějšího plechu o menším ložném objemu. Naopak v zahradnictví, kde se převáží zpravidla biologický materiál, je kotel vyroben z tenčího plechu a má větší objem. Trubky spojující kotel s kolem slouží zároveň jako řídítka a jsou vyrobeny z ocele. [1]

### 2.2 Parametry vozíku

Nejdůležitějším parametrem kolečka je jeho nosnost. V katalogu bývá uváděna nosnost okolo 100 kg. Při uvážení, že kolečko je poháněno lidskou silou lze usoudit, že tato hmotnost je nepřiměřená. Standardně se na kolečku převáží náklady o hmotnosti cca 50 kg. Dalším důležitým parametrem je průměr kola, který bývá nejčastěji 40 cm. Samotné kolečko váží cca 20 kg a objem ložné plochy se pohybuje v rozmezí od 60 do 100 litrů. Parametry potřebné pro výpočet výkonu a momentu jsou uvedeny v následující tabulce. [1]

**Tabulka 2.1: Parametry vozíku pro výpočet výkonu a momentu [1]**

|  |                     |
|--|---------------------|
| <i>Hmotnost nákladu a vozíku</i>       | 70 kg               |
| <i>Maximální rychlost</i>              | 5 kmh <sup>-1</sup> |
| <i>Poloměr kola</i>                    | 200 mm              |
| <i>Maximální úhel nakloněné roviny</i> | 20°                 |

### 2.3 Výhody a nevýhody elektrického pohonu

Elektrický pohon kolečka má řadu výhod i nevýhod. Mezi výhodou lze určitě zařadit nenáročnost pro lidskou sílu při vzbě nákladu jednak po rovině, ale i do kopce. Při přítomnosti měniče s rekuperačním brzděním bude jízda z kopce plynulejší a jednodušší v tom, že člověk nebude muset vynakládat sílu na brzdění. Dále by se při tomto brzdění dobíjela baterie, čímž by se zvyšoval její dojezd. Nevýhodou je



však zvýšená celková hmotnost kvůli komponentům pohonu. Baterie bude mít relativně krátký dojezd a bude nutné ji často nabíjet.

## 2.4 Výpočet potřebného výkonu motoru

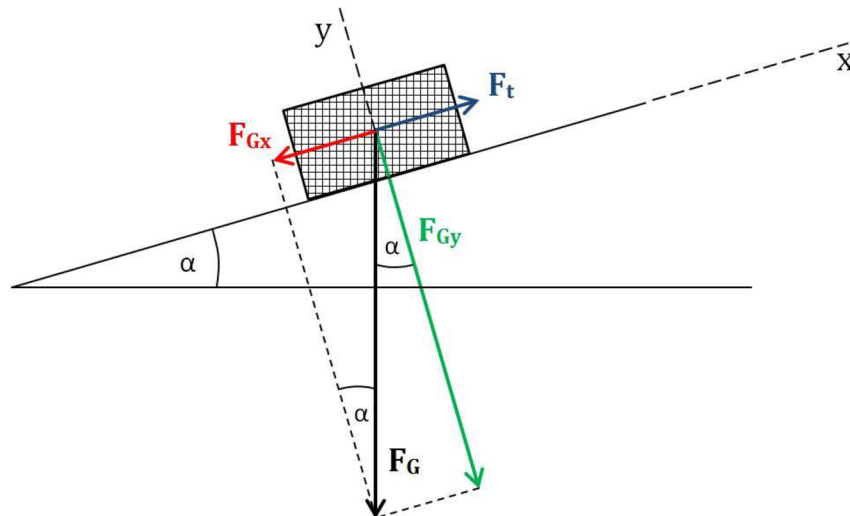
Pro výpočet potřebného mechanického výkonu elektromotoru vyjdeme z obecné rovnice pro výkon. Výkon charakterizuje vykonanou práci za jednotku času. Platí tedy:

$$P = \frac{W}{t}, \quad (1)$$

kde  $W$  je množství vykonané práce a  $t$  je jednotka času. Práce vyjadřuje působící sílu na těleso, které se posunulo o určitou vzdálenost, tedy dráhu. Pak pro výpočet mechanické práce můžeme psát:

$$W = F \cdot s, \quad (2)$$

kde  $F$  vyjadřuje velikost síly působící na těleso a  $s$  je dráha, o kterou se těleso posunulo. Jelikož se vozík bude pohybovat i po nakloněných rovinách, a tedy směr síly nebude rovnoběžný s podložkou, do vztahu se musí započítat úhel svírající směr působení síly a směr trajektorie pohybu tělesa. Pro určení správné velikosti síly lze vyjít z následujícího obrázku.



Obrázek 2.1: Rozložení sil v nakloněné rovině [2]

V obrázku je použita kartézská osa souřadnic  $x$  a  $y$  natočená o úhel  $\alpha$  vzhledem k vodorovné podložce. Síla  $F_G$  vyjadřuje silové působení tělesa na nakloněnou rovinu a dá se rozdělit na dvě síly působící v ose  $x$   $F_{Gx}$  a v ose  $y$   $F_{Gy}$ . Při zanedbání tření je patrné, že minimální síla potřebná pro táhnutí tělesa nahoru musí být větší než síla  $F_{Gx}$ . Z obrázku vyplývá, že pro  $\sin \alpha$  platí tento vztah:

$$\sin \alpha = \frac{F_{Gx}}{F_G} \quad (3)$$

Z toho vztahu lze již jednoduše určit výslednou sílu  $F_{Gx}$ , která je rovna hledané síle pro tah  $F_t$  a odpovídá síle  $F$ :

$$F_{Gx} = F_t = \sin \alpha \cdot F_G, \quad (4)$$

kde  $\alpha$  vyjadřuje úhel, který svírá směr působící síly s trajektorií pohybu tělesa. Vztah pro práci se změnil na tento tvar:

$$W = F_G \cdot s \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

Po dosazení vzorce pro mechanickou práci se vztah pro výpočet výkonu změnil takto:

$$P = \frac{F_G \cdot s \cdot \sin \alpha}{t}, \quad (6)$$

V tomto vztahu se již vyskytuje rychlost. Nyní lze dosadit za člen  $s/t$  rychlost pohybu  $v$ . Pak bude vztah vypadat takto:

$$P = F_G \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Síla  $F_G$  v tomto vztahu vyjadřuje celkovou hmotnost tělesa  $m$  vynásobenou konstantou tíhového zrychlení  $g$ .

$$F_G = m \cdot g \quad (8)$$

Dosazením do vztahu (7) vznikne tento tvar:

$$P = m \cdot g \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Ve vztahu se již vyskytují známé veličiny. Za hmotnost  $m$  se musí dosadit hmotnost samotného vozíku a hmotnost převáženého nákladu. Váha samotného vozíku a elektrických zařízení pro pohon se pohybuje okolo 20 kg a maximální převážený náklad bude dosahovat hmotnosti 50 kg. Proto celková hmotnost bude 70 kg. Požadovaná rychlost bude odpovídat rychlosti lidské chůze, tedy  $5 \text{ kmh}^{-1}$ . Úhel  $\alpha$  vyjadřuje maximální úhel kopce, který bude muset vozík vyjet. Vzhledem k místu provozu vozíku lze úhel  $\alpha$  odhadnout na  $20^\circ$ .

Před dosazením číselných hodnot do vztahu (9) je nutné všechny jednotky převést na základní jednotky SI. Proto pro přepočtení rychlosti z kilometrů za hodinu na metry za sekundu bude platit:

$$v_{m/s} = \frac{v_{km/h}}{3,6} \quad (10)$$

Číselně tedy:

$$v_{m/s} = \frac{5}{3,6} = 1,389 \text{ ms}^{-1}$$

Nyní lze dosadit číselně do vzorce (9). Hodnota tíhového zrychlení je  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ .

$$P = 70 \cdot 9,81 \cdot 1,389 \cdot \sin 20^\circ = \underline{\underline{326,23 \text{ W}}}$$

Potřebný výkon elektromotoru je tedy 326,23 W. Nutno však podotknout, že tento výkon je potřeba v krajním případě, tzn. při nákladu 50 kg a nejvyšším úhlem nakloněné roviny. Zároveň při jízdě do kopce se rychlost sníží, a lze tedy předpokládat snížení potřebného výkonu. Velkou výhodou elektromotorů je jejich přetížitelnost. V praxi to znamená, že motor může mít menší nominální výkon než je ten, kterého bude muset dosáhnout. Tento fakt se dá uplatnit i v tomto případě,

a proto může být nominální výkon nižší než 326,23 W. Důležité ovšem je, aby byl na přetížení motoru správně dimenzován měnič.

Dalším faktem ovlivňujícím výkon motoru je ten, že kolečko bude řízeno člověkem. Znamená to tedy, že člověk bude další zdroj výkonu pro pohon.

Vzhledem k těmto skutečnostem bude ideální zvolit takový motor, jehož nominální výkon se bude pohybovat v rozmezí od 150 W do 250 W. Pokud by motor měl nominální výkon vyšší, znamenalo by to, že by stoupla jeho váha a celkově by se zvýšila hmotnost vozíku. S vyšším nominálním výkonem roste i moment motoru při konstantní rychlosti, což by nepříjemně ovlivnilo adhezi. Při rozjezdu by hrozilo buď mechanické poškození převodovky, nebo prokluz poháněného kola. Další nevýhodou motoru s vyšším nominálním výkonem je jeho vyšší cena. [2]

## 2.5 Výpočet potřebného momentu

Točivý moment charakterizuje točivou sílu, kterou je nutno vyvinout k rozjezdu vozíku. Pro výpočtu točivého momentu je nutné znát poloměr poháněného kola a sílu, kterou bude muset uvést do pohybu. Obecný vztah pro výpočet momentu vypadá takto:

$$M = F_t \cdot r, \quad (11)$$

kde  $r$  je poloměr kola a  $F_t$  je zátěžná síla. Její velikost je určena hmotností tělesa  $m$ , gravitačním zrychlením  $g$  a úhlem nakloněné roviny  $\alpha$ . Lze ji vypočítat takto:

$$F_t = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

Určení goniometrické funkce je stejné jako v kapitole 2.4. Pro moment tedy lze psát:

$$M = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot r \quad (13)$$

Vozík bude vážit celkově 70 kilogramů. Úhel stoupání bude maximálně 20° a poloměr poháněcího kola je 20 cm. Nyní lze dosadit hodnoty číselně:

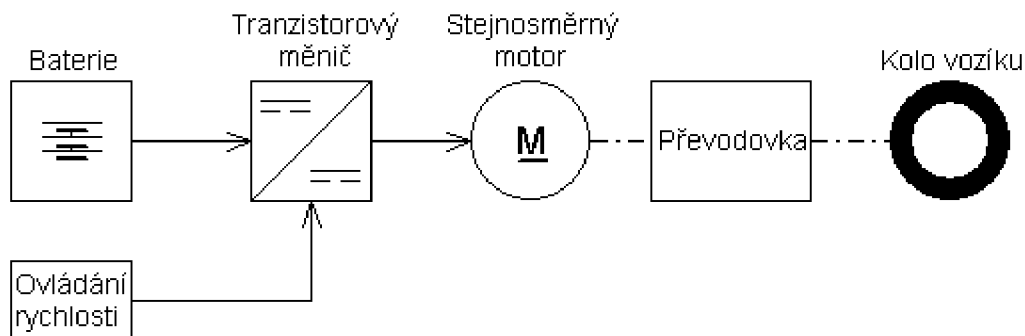
$$M = 70 \cdot 9,81 \cdot \sin 20^\circ \cdot 0,2 = \underline{\underline{46,98 \text{ Nm}}}$$

Potřebný moment na poháněném kole k rozjezdu vozíku je tedy 46,98 Nm.

[3]

## 3 KONCEPCE POHONU

Celkový pohon vozíku se bude skládat z baterie, měniče, motoru a soustrojí pro přenos momentu na poháněné kolo (viz obrázek 3.1). Baterie bude o vhodném napětí a bude napájet měnič. Měnič bude zajišťovat plynulý rozběh motoru. Motor bude s poháněným kolem spojen převodovkou. Převodovka bude zároveň zajišťovat potřebný převodový poměr, aby motor nemusel mít velký moment.



Obrázek 3.1: Koncepce pohonu

### 3.1 Požadavky na motor

Při volbě motoru k pohonu stavebního kolečka je nutno přihlídnout na tyto skutečnosti. Motor musí mít adekvátní výkon a moment. Z výpočtu v kapitole 2.4 je známo, že motor bude muset mít výkon v rozmezí 150 W až 250 W. Jmenovité napětí motoru by mělo být větší než 12 V, ovšem ne větší jak 48 V. Použití motoru na síťové napětí 400/230 V nepřichází v úvahu z ekonomických důvodů. Dále motor musí mít odpovídající otáčky. Optimálně by motor měl mít nízké otáčky, ovšem tím se zvětší jeho hmotnost. Proto bude výhodné použít vysokootáčkový stroj s převodovkou. [3]

#### 3.1.1 Střídavý asynchronní motor

Konstrukčně patří mezi nejjednodušší elektromotory. Konstrukčně se dělí na motory kroužkové a motory s kotvou nakrátko. Pro pohony je však vhodnější motor s kotvou nakrátko. Jelikož neobsahuje žádné části vyžadující údržbu, dosahuje dlouhé životnosti a provozní spolehlivosti. Velkou výhodou je i nízká pořizovací cena. V drtivé většině jsou asynchronní motory vyráběny pro síťové napětí 400/230 V. Pro napájení ze zdroje nízkého napětí by musel být motor převinut, nebo by musel být před motor vložen zvyšující měnič. Motor ke svému provozu vyžaduje střídavé harmonické napětí. Proto je nutno před motor vřadit střídač, který stejnosměrné napětí rozstřídá na harmonické střídavé napětí. Další nevýhodou je velká setrvačnost rotoru, která nepříznivě působí na dynamiku

pohonu a celkovou účinnost provozu. To způsobuje přítomnost zpravidla hliníkového vinutí v rotoru. [4]

### **3.1.2 Střídavý synchronní motor**

Synchronní motory v poslední době našly uplatnění i v pohonech. Tyto motory charakterizuje velmi vysoká účinnost a malé rozměry a hmotnost při stejném jmenovitém výkonu ve srovnání s asynchronními motory. Pro aplikaci v pohonech se synchronní motory vyrábějí s permanentními magnety umístěnými v rotoru. Toto řešení nabízí dobrou spolehlivost a bezúdržbový chod. Dále se také příznivě ovlivní moment setrvačnosti rotoru. Nevýhodná je však cena permanentních magnetů, které se vyrábějí ze vzácných zemin. Další nevýhodou je obtížný rozběh motoru a napájení střídavým napětím. Obě tyto nevýhody by vyřešilo použití střídače s otáčkovým regulátorem. [4]

### **3.1.3 Stejnoseměrný motor**

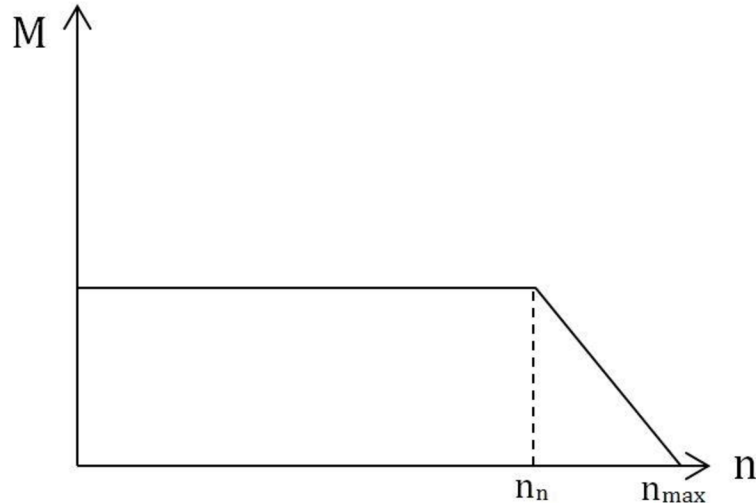
Stejnoseměrný kartáčový motor patří mezi nejjednodušší a nejlevnější elektromotory. Motor však ke své správné funkci vyžaduje použití komutátoru, který výrazně zhoršuje vlastnosti a životnost motoru. Tím, že kartáče nepřiléhají dokonale na lamely rotoru, vznikají elektrické ztráty. Dále je nutné komutátor pravidelně udržovat tím, že budou vyměněny opotřebované uhlíkové kartáče. Mezi výhody stejnosměrného motoru patří jednoduchá regulovatelnost. Nejprve změnou napětí na kotvě motoru, a následně změnou proudu v budícím obvodu. K řízení otáček nevyžadují složité a drahé elektronické obvody. V zapojení budícího vinutí do série motor získá tzv. trakční momentovou charakteristiku, která je velmi výhodná pro použití v pohonech. Motor má při nízkých otáčkách velký moment, a při zvyšující se rychlosti moment dále klesá. Nevýhodou se však jeví jejich vysoká hmotnost při stejném výkonu ve srovnání s asynchronním motorem. [4]

#### **3.1.3.1 Stejnoseměrný motor s permanentními magnety**

Dnes se lze běžně setkat se stejnosměrnými motory, které jsou buzeny pomocí permanentních magnetů. Motor se konstrukčně zjednoduší, a také se sníží objem a hmotnost při zachování stejného výkonu jako u motoru s komutátorem. Nevýhoda pramenící z použití permanentních magnetů je ta, že motor lze regulovat pouze napětím na kotvě motoru. Tím se zhorší možnosti řízení motoru. Jelikož se permanentní magnety vyrábí ze vzácných zemin, motory jsou celkově dražší než motory s komutátorem. [4]

### 3.1.4 Stejnosměrný elektricky komutovaný motor

Stejnosměrný elektricky komutovaný motor je také znám pod označení BLDC motor (z anglického „*Brushless DC motor*“) nebo EC motor (z anglického „*Electronically commutated*“). Oproti klasickému stejnosměrnému motoru má velkou výhodu v tom, že nemá mechanický komutátor. Ten je zdrojem jiskření, poruch a snižuje účinnost motoru. Zároveň se motor stává téměř bezúdržbovým. Na statoru je navinuto třífázové vinutí a rotor je vyroben z permanentních magnetů. Motor je napájen stejnosměrným napětím, které je převedeno na střídavé napětí s obdélníkovým průběhem. Motor tudíž ke svému provozu potřebuje složité elektronické obvody. Vinutí je navinuto na statoru, ze kterého lze lépe odvádět teplo. Při zachování stejného výkonu má menší rozměry a hmotnost než stejnosměrný motor s kartáči. Výhodná je i momentová charakteristika motoru, která je téměř rovná. Znamená to tedy, že lze motor provozovat při nižších otáčkách se stejným momentem, jako při provozování motoru se jmenovitými otáčkami. Na obrázku 3.2 je znázorněna momentová charakteristika BLDC motoru. Jelikož je rotor vyroben z permanentních magnetů na bázi vzácných zemin, je hmotnost rotoru menší, a tudíž má motor i lepší dynamické vlastnosti. Zároveň se však tímto faktem cena motoru zvyšuje. Jak již bylo řečeno, motor ke svému provozu vyžaduje drahý měnič s čidly polohy rotoru. [5]



Obrázek 3.2: Momentová charakteristika elektricky komutovaného motoru [5]

### 3.1.5 Srovnání motorů

Výběr vhodného motoru pro pohon vozíku bude ovlivňovat několik faktorů. V první řadě by měl být motor odpovídající výkon v rozmezí od 150W do 250 W. Dále by měl mít vyšší jmenovité napětí než 12 V a zároveň menší než 48 V. Jiné napěťové hladiny nepřicházejí v úvahu. Použití napěťové hladiny 12 V a nižší by mělo

za následek zvýšení proudu a zvětšení průřezů vodičů. Naopak při použití napěťové hladiny vyšší než 48 V by bylo komplikované obstarat zdroj energie s vysokým napětím. Pro pohon vozíku bude vhodnější motor o malém objemu a hmotnosti. Proto by motor neměl mít příliš nízké otáčky, jelikož moment roste s klesajícími otáčkami. Se zvyšujícím se momentem roste také objem a hmotnost motoru. Důležitým faktorem bude také druh napájecího napětí. Zdrojem energie pro motor bude baterie, která bude dodávat stejnosměrný proud. Další požadavek bude kladen na momentovou charakteristiku. Motor by měl mít velký záběrný moment při nízkých rychlostech. Méně důležitým faktorem při výběru motoru bude pravidelnost jeho údržby. Vozík bude v provozu pouze několik desítek minut týdně, a proto bude údržbový cyklus mnohonásobně delší. V neposlední řadě bude velmi důležitá cena motoru, která bude velmi výrazně ovlivňovat cenu celého projektu.

V následující tabulce jsou porovnány vybrané vlastnosti výše uvedených motorů.

**Tabulka 3.1: Porovnání některých parametrů vybraných elektrických motorů**

| <b>Typ motoru</b>                                | <i>Cena</i> | <i>Údržba</i> | <i>Momentová charakteristika</i> | <i>Typ řízení</i>                            | <i>Efektivita</i> |
|--|-------------|---------------|----------------------------------|--|-------------------|
| <b>Střídavý asynchronní</b>                      | Nízká       | Nízká         | Zakřivená                        | Střídač s měničem kmitočtu                   | Vysoká            |
| <b>Střídavý synchronní</b>                       | Vysoká      | Nízká         | Plochá                           | Střídač s měničem kmitočtu                   | Nejvyšší          |
| <b>Stejnoseměrný sériový</b>                     | Nízká       | Periodická    | „Trakční“                        | Jednoduchý regulátor                         | Nízká             |
| <b>Stejnoseměrný s permanentními magnety</b>     | Nízká       | Periodická    | Téměř plochá                     | Jednoduchý regulátor                         | Střední           |
| <b>Stejnoseměrný elektricky komutovaný motor</b> | Vysoká      | Nízká         | Plochá                           | Měnič s mikroprocesorem a polohovým snímačem | Nejvyšší          |

V tabulce 3.1 jsou uvedeny některé vlastnosti výše uvedených elektromotorů. Nutno podotknout, že vlastnosti jednotlivých motorů se mohou výrazně lišit. Vlastnosti jednotlivých motorů závisí na oblasti využití. Proto tabulka 3.1 slouží jenom jako orientační porovnání vybraných vlastností motorů.

Méně významným parametrem uvedeným v tabulce 3.1 je tvar momentové charakteristiky. Jak již bylo naznačeno v kapitole 3, bude motor řízen měničem. Ten je schopen tvar momentové charakteristiky modifikovat tak, aby měl motor při nízkých otáčkách vysoký točivý moment. Uvedené parametry momentové charakteristiky jsou pouze informativního charakteru a nebudou mít vliv na výběr motoru.

Prvním kritériem pro výběr motoru bude především druh napájecího napětí a jeho velikost. V případě použití motorů na střídavé napětí by se muselo stejnosměrné napětí dodávané z baterie převést na střídavé harmonické, což by si vyžádalo konstrukci velmi složitého a cenově náročného měniče. Ten by musel obsahovat střídač a také měnič kmitočtu potřebný k řízení otáček motoru. Navíc drtivá většina asynchronních motorů je vyráběna pro síťové napětí 400/230V, což by si vyžádalo převinutí motoru na nižší napěťovou hladinu. To by znamenalo další prodražení celého projektu.

Parametrem, podle kterého jsou posuzovány elektrické motory, je pravidelnost údržby. Jak je vidět z tabulky 3.1 pravidelnou údržbu vyžadují oba typy stejnosměrných motorů. Ke svému provozu totiž vyžadují komutátor, který obsahuje kartáče vyrobené z uhlíku. Tyto uhlíkové kartáče se během provozu opotřebovávají a v pravidelných časových úsecích výměnu. Tento fakt v případě provozu vozíku není až tak důležitý, protože vozík bude provozován několik desítek minut týdně. Uhlíkové kartáče se za uvedenou dobu provozu opotřebují jen velmi málo. Naopak téměř žádnou údržbu nevyžadují ostatní stroje uvedené v tabulce 3.1. Neobsahují totiž žádné části náchylné k poruše.

Efektivita elektrického motoru vypovídá o velikosti energetických ztrát a momentu setrvačnosti. Obě tyto vlastnosti ovlivňují celkovou účinnost motorů. Tabulka 3.1 ukazuje, že nejefektivnějším motorem je střídavý synchronní a stejnosměrný elektricky komutovaný. Tyto motory mají především malý moment setrvačnosti díky přítomnosti permanentních magnetů v rotoru. Dobrou efektivitu provozu také vykazují motory střídavé asynchronní. Naopak nejhorší účinností potom disponují motory stejnosměrné kartáčové. To je způsobeno především přítomností komutátoru, kde vznikají úbytky napětí, a tak dochází k energetickým ztrátám.

V neposlední řadě je důležitým faktorem pro výběr motoru pořizovací cena. Z tabulky 3.1 je patrné, že nejdražší motory jsou střídavé synchronní a stejnosměrné elektricky komutované. Je to způsobeno především použitím permanentních magnetů na bázi vzácných zemin, které jsou v dnešní době velmi drahé. Naopak ostatní uvedené motory jsou cenově příznivější. Nízká cena těchto motorů je způsobena především jednoduchostí konstrukce, kde se nevyskytují žádné drahé prvky.

### **3.1.6 Výběr motoru**

Při výběru motoru bude rozhodovat pořizovací cena a celková cena projektu. Tedy i cena, která bude zahrnovat konstrukci měniče. Jisté vlastnosti se dají korigovat vhodným nastavením měniče.



Nejvhodnější typy motorů se jeví motory střídavé synchronní a stejnosměrné elektricky komutované. Z konstrukčního hlediska se jedná o velmi podobné stroje, které v rotoru obsahují permanentní magnety. Motory disponují optimální momentovou charakteristikou pro pohon, kterou lze ještě modifikovat pomocí měniče. Výhodná je také jejich vysoká účinnost provozu, a to díky malému momentu setrvačnosti a nízké hodnotě elektrických ztrát. Mezi nevýhody těchto motorů patří vysoká pořizovací cena a nutnost napájení přes složité a cenově náročné měniče. Jelikož cena je v projektu klíčová, lze tyto motory považovat za nevhodné.

Mezi další vhodné motory lze zařadit střídavé asynchronní motory. Jedná se o nejjednodušší konstrukční stroj, který vyniká svou nízkou pořizovací cenou. Momentová charakteristika se může zdát pro pohon nevýhodná, ovšem v kombinaci s mikroprocesorovým měničem lze tuto charakteristiku do jisté míry upravit. Dále také dosahuje dobré účinnosti i přes to, že rotor motoru má velký moment setrvačnosti, který nepříznivě ovlivňuje dynamiku pohonu a do jisté míry i účinnost. Mezi nevýhody lze zařadit cenové požadavky na řízení motoru. Dále drtivá většina asynchronních motorů je konstruována na síťové napětí 400/230 V, což by znamenalo nutnost převinutí motoru na nižší napěťovou hladinu. Tímto krokem opět vzrostou celkové náklady projektu. Celkově lze usoudit, že pohon s použitím asynchronního motoru by vyšel cenově velmi nákladně.

Stejnosemýrný motor s permanentními magnety vyniká především díky své jednoduchosti a nízké pořizovací ceně. Použitím permanentních magnetů se dosáhne zvýšení výkonu a snížení hmotnosti a objemu motoru. Momentová charakteristika je taktéž výhodná, jelikož je téměř plochá a s rostoucími otáčkami moment lehce klesá. Dále také nevyžaduje řízení složitým měničem, což se příznivě projeví na ceně projektu. Mezi nevýhody stejnosměrného motoru s permanentními magnety patří především přítomnost komutátoru. Na něm vznikají poměrně velké elektrické ztráty, což se projeví na celkové účinnosti. Komutátor navíc vyžaduje pravidelnou údržbu v podobě výměny opotřebovaných uhlíkových kartáčů. I přes své nevýhody, lze tento typ motoru použít pro pohon vozíku.

Stejnosemýrný motor se sériovým buzením má hlavní přednosti ve tvaru své momentové charakteristiky a své nízké pořizovací ceně. K řízení motoru postačuje jednoduchý a levný měnič. Nevýhodou tohoto motoru je mimo jiné komutátor, který vyžaduje pravidelnou výměnu uhlíkových kartáčů. Dále je příčinou nižší účinnosti motoru, kdy na něm vznikají úbytky napětí, a tím dochází k ztrátám energie. Na rozdíl od předchozích typů tento motor má nejhorší poměr velikosti k výkonu. I přes své značné nevýhody, lze tento motor použít jako pohon pro vozík především díky příznivé ceně.

## 3.2 Požadavky na baterii

Baterie bude sloužit jako zdroj elektrické energie pro elektromotor poháněného vozíku. Při výběru vhodné baterie se musí v první řadě zvolit optimální napěťová hladina. Při volbě nízké napěťové hladiny, například 12 V stejnosměrných a nižší, bude nutno zvyšovat průřezy kabelů kvůli většímu proudu a tím by se projekt stal neekonomickým. Napěťové hladiny 24 V a 48 V jsou typické baterie pro pohonářské aplikace. Navíc tyto napěťové hladiny jsou dostupnější, protože jsou hojně zastoupeny v modelářských aplikacích typu RC. Při použití baterie ve vozíku bude z baterie pomalu odebírán proud až do jejího úplného vybití.

### 3.2.1 Olověné baterie

Olověný akumulátor v dnešní době patří mezi nejpoužívanější sekundární zdroj elektrické energie. Sekundárním zdrojem jsou označovány proto, že dokáží elektrickou energii vydávat ale i přijímat a následně i akumulovat. Primární zdroje jsou označovány takové baterie, které mohou elektrickou energii pouze vydávat.

Olověný akumulátor tvoří elektrody vyrobené z olova ponořené v elektrolytu. Elektrolyt bývá nejčastěji zředěná kyselina sírová v kapalném stavu. U speciálních akumulátorů může být elektrolyt nasáknut ve speciální vatě ze sklených vláken anebo se vyskytuje ve formě gelu. Více olověných akumulátorových článků spojených dohromady tvoří akumulátorovou baterii. Při vybíjení vzniká vratná chemická reakce, která zředí elektrolyt. Kyselina sírová se totiž spotřebovává a vzniká z ní voda. Při nabíjení je děj opačný. Chemická reakce způsobená přítomností elektrického náboje opět zhušťuje elektrolyt. Jedním z ukazatelů nabití akumulátoru jsou unikající bubliny. To znamená, že elektrolyt je plně zhuštěn a začíná elektrolyza vody, při které vzniká mimo jiné i vzduch. Olověné akumulátory se v první řadě dělí podle nutnosti údržby. [6]

#### 3.2.1.1 Olověné akumulátory vyžadující údržbu

Olověné akumulátory vyžadující údržbu mají ve většině případů nádobou vyrobenou z izolačního materiálu. Navíc všechny části akumulátoru musí být vyrobeny z materiálu odolného vůči dlouhodobému působení účinku kyseliny sírové. Proto jsou všechny proudovodné dráhy vyrobeny z olova nebo ze slitin olova, které nejlépe odolávají těmto účinkům. Dále musí být akumulátor vybaven ventilační zátkou. Ta zajišťuje při nabíjení odvod plynů při přebití, ale zároveň nesmí připustit vylití elektrolytu při mírném naklonění. Ventilačním otvorem lze doplňovat elektrolyt, kontrolovat jeho hustotu a hladinu. [7]

### 3.2.1.2 Olověné akumulátory bezúdržbové

Výhoda bezúdržbových olověných akumulátorů spočívá především v tom, že se u nich nemusí kontrolovat hladina, stav a hustota elektrolytu. Jelikož jsou elektrody dotovány vápníkem, jsou plyny vznikající při normálním dobíjení z větší části zpětně absorbovány. Při velkém přebití však může tlak značně vzrůst, a proto tyto akumulátory obsahují bezpečnostní jednocestné přetlakové ventily. Ty umožňují odvod plynů ven z akumulátoru, ale vnik okolního vzduchu do akumulátoru již neumožňují. Jako u každého akumulátoru i bezúdržbové olověné akumulátory potřebují základní údržbu, a to v podobě ošetření vývodů před oxidací, ochranou před korozí a pravidelným dobíjením během delší odstávky. Mezi přednosti těchto akumulátorů patří dlouhá životnost, jednoduchá manipulace a možnost úplného vybití. [7]

Bezúdržbové akumulátory lze rozdělit do tří základních skupin podle formy elektrolytu.

#### Olověné akumulátory se zaplavenými elektrodami

Jedná se o speciální typ údržbových akumulátorů, které se liší v použití materiálu pro elektrody. Dřívější údržbové akumulátory měli elektrody vyrobeny jako mřížku z olova dotovanou antimonem. Dnešní bezúdržbové akumulátory mají mřížky legované vápníkem. To se příznivě projevuje snížením odparu vody při nabíjení. Tímto způsobem je dosaženo, že hladina elektrolytu klesá jen velmi málo a udržuje se na bezpečné hladině po celou dobu životnosti akumulátoru.

Jejich výhodou je vysoká odolnost a nízká cena. Dobře zvládají vysoké krátkodobé proudy, a proto se s oblibou uplatňují jako baterie pro automobily. Navíc je možné je nabíjet jakoukoli nabíječkou. Nevýhodou ovšem je jejich krátká životnost, vysoká hmotnost a malá kapacita. Dále se nesmí skladovat vybité, pak hrozí jejich zničení. [6]

#### Akumulátory s vázaným elektrolytem v separátoru – AGM

Označení AGM pochází z anglického výrazu *Absorbed Glass Mat*. Tato technologie nepracuje s tekutým elektrolytem, ale jak již napovídá označení, elektrolyt se váže na netkanou textilií ze skelných vláken v separátoru. Separátor odděluje kladné a záporné elektrody a stará se o to, aby nedošlo k mezi mřížkovým zkratům. Separátor má velkou absorpční schopnost a vysokou iontovou vodivost. To příznivě působí na životnost a zkracuje dobu nabíjení. Zároveň však jsou tyto akumulátory náchylné na přebíjení, kdy dochází k vývinu plynů a zároveň se zvyšuje tlak v akumulátoru. Proto je většina z nich vybavena speciálním přetlakovým ventilem, který se při přetlaku otevře a plyn vypustí. Z toho vyplývá, že tento typ akumulátoru je nutné nabíjet speciální elektronickou nabíječkou. Tato

nabíječka hlídá napětí akumulátoru, a pokud je toto napětí překročeno sníží jeho velikost na tzv. udržovací napětí.

Mezi velké výhody těchto akumulátorů patří více než dvojnásobná životnost ve srovnání s klasickými zaplavenými olověnými bateriemi. Je velmi odolná vůči otřesům, má velkou kapacitu při nižší hmotnosti a lepší výkon při odběru vysokých proudů. Lépe zvládají hluboké vybití a cyklickou zátěž (opakované nabíjení a vybíjení). [8]

### **Gelové akumulátory**

Olověné gelové akumulátory jsou konstrukcí podobné akumulátorům se zaplavenými elektrodami, avšak hlavní rozdíl je v použití elektrolytu. Zatímco u prvně jmenovaného typu akumulátoru je elektrolyt v tekuté formě, u těchto akumulátorů se elektrolyt vyskytuje ve formě gelu. Základem je opět kyselina sírová, do které je přidán jemný prášek oxidu křemíku a dalších příměsí. Tímto způsobem se změní forma elektrolytu z tekutého na gelovou suspenzi. Jedná se o uzavřenou konstrukci s několika elektrodami v podobě mřížek, které jsou vyrobeny z olověného kompozitu dotovaného vápníkem. Právě vápník zajišťuje nízký vývin plynů při nabíjení. Pro případy přebití, a tedy většímu vývinu plynů, jsou akumulátory vybaveny bezpečnostním ventilem, který reguluje tlak v nádobě. Tak jako akumulátory typu AGM jsou i gelové akumulátory náchylné na přebití (resp. zvýšenému vývinu plynů v nádobě), a proto se musí nabíjet speciální elektronickou nabíječkou. Ta opět zabraňuje přebití akumulátoru tak, že při plném nabití sníží původní hodnotu nabíjecího napětí na hodnotu tzv. udržovací.

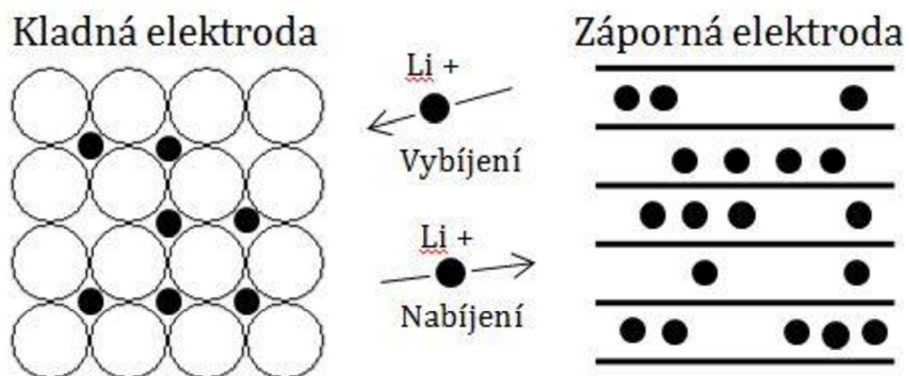
Výhody olověného akumulátoru jsou velmi podobné jako u akumulátoru typu AGM. Mezi hlavní výhody patří odolnost proti otřesům, dlouhá životnost a nižší riziko úniku elektrolytu. Dobře zvládají cyklickou zátěž (opakované nabíjení a vybíjení) a hluboké vybití. Oproti akumulátorům AGM jsou méně citlivé na vyšší provozní teplotu. Špatně však zvládají vysoké nabíjecí a vybíjecí proudy. [6]

### **3.2.2 Lithiové baterie**

Lithiové baterie jsou v praxi známé pod obchodní zkratkou *Li-oin*, což je zkráceně *Lithium-iont battery*. Zkratu Li-oin poprvé použila firma SONY, a to v roce 1990, kdy poprvé představila pokrokovou lithium iontovou technologii akumulátorů. Od této doby se Li-ion akumulátory v různém provedení rozšiřují do všech oblastí využívající nezávislý zdroje energie, kde se naplno uplatňují jejich výhody. [10]

Tak jako většina akumulátorů se lithiové akumulátory skládají ze dvou elektrod (kladné záporné), mezi nimiž je elektrolyt. Kladná elektroda se vyrábí nejčastěji z různých sloučenin oxidů lithia např. oxid lithium-kobalt, oxid lithium-mangan a další. Zápornou elektrodu tvoří sloučenina porézního uhlíku. Elektrolyt

nejčastěji tvoří lithium hexafosfát, který bývá rozpuštěn v rozpouštědle. Elektrody jsou svinovány do ruliček a celý akumulátor se pak nachází v kovovém obale, tzv. dýnku. [10]



**Obrázek 3.3: Pohyb iontů lithia při nabíjení a vybití, převzato z [10] a upraveno autorem**

Během vybití akumulátoru putují ionty lithia ze záporné elektrody na kladnou elektrodu. Při nabíjení je to naopak, tedy že ionty lithia putují z kladné elektrody na zápornou. Princip přenosu iontů lithia je na obrázku 3.3. Hlavním rozdílem oproti jiným akumulátorům je ten, že při přesunu iontů lithia nedochází k chemické reakci během vměšování iontů do struktury materiálu. Právě tento fakt, kdy nedochází k žádné chemické reakci, příznivě ovlivňuje životnost akumulátoru bez velkých výkonových změn. [11]

Velkou výhodou je poměrně vysoké jmenovité napětí jednoho článku, které dosahuje hodnoty 3,6 V. Díky tomuto faktu články vykazují vysokou energetickou hustotu, což se kladně projeví na hmotnosti baterie. Tyto články umožňují rychlé nabíjení na 90% kapacity akumulátoru, pak je vhodné dobíjet sníženým proudem při konstantním napětí. Nevýhodou ovšem je použití lithia a jeho sloučenin, jelikož je to velmi reaktivní látka reagující a degradující při kontaktu se vzduchem a vlhkostí. Proto se musí s lithiovými akumulátory pracovat velmi opatrně, aby nedošlo k poškození nebo propíchnutí pláště. Novější akumulátory pracují s méně reaktivními materiály, ovšem při narušení článku hrozí i jeho vznícení. Při vzniku zkratu se akumulátor prudce zahřeje a i zde hrozí zapálení materiálů v okolí akumulátoru. Další nevýhodou je postupný pokles kapacity článku po prvním nabití. Nevratným procesem materiály uvnitř akumulátoru degradují a ztrácí své původní vlastnosti. Tyto akumulátory jsou také velmi náchylné na nízké pracovní teploty, při nichž dochází ke snížení výkonosti článku. [11]

### 3.2.2.1 Lithium polymerové baterie

Lithium polymerové baterie (zkráceně Li-pol) se od lithiových akumulátorů liší především v použitém elektrolytu. Nachází se zde v pevném stavu a je tvořen iontově vodivou polymerní sloučeninou. Jelikož se články nacházejí ve speciální hliníkové fólii lze je i do určité míry formovat. Neznamená to ovšem, že jsou odolné

vůči deformaci. I zde hrozí riziko zkratu a deformace struktury článku. Elektrody jsou pokládány na sebe a nejsou svinovány jako u lithiových článků, a proto se mohou vyrobit v různých tvarech. [11]

Výhodou těchto akumulátorů je jejich nižší hmotnost při stejné kapacitě oproti lithiovým článkům. Další výhodou je jejich poměrně dobrá tvárnost. To se využívá především u notebooků, mobilních telefonů a jiné elektroniky, kde se takto vyplňují volné prostory. Dále zde nehrozí nebezpečí úrazu či vzniku požáru při roztržení nebo deformaci obalu. Akumulátory velmi dobře zvládají vysoké krátkodobé vybíjecí proudy a také vysoké nabíjecí proudy. Optimální nabíjení probíhá jako u lithiových akumulátorů. Ovšem velmi špatně zvládají hluboká vybití, kdy zpravidla dochází k nafouknutí akumulátoru. Ve většině případů to bývá způsobeno dlouhodobým skladováním nenabitého článku opatřeného elektronikou, která malým proudem vybíjí akumulátor. [11]

### **3.2.2.2 Ostatní lithiové akumulátory**

Mezi další známe lithiové články, patří akumulátor na bázi lithium-železo-fosfátu (zkráceně LiFe). V některých případech je článek obohacen ytriem pro lepší vodivost a zvýšenou stabilitu. Jejich energetická hustota je nižší oproti Li-ion a Li-pol akumulátorům, tudíž mají vyšší hmotnost. Výhodou je ovšem jejich vyšší proudová zatížitelnost a lepší odolnost vůči hlubokému vybití. Ovšem ani tyto články nedokáží zcela dobře čelit hlubokému vybíjení a takto podvybíjené články rychle ztrácí kapacitu a krátí se jejich životnost. S oblibou jsou používány jako náhrada starých akumulátorů na bázi olova, jelikož čtyř-člávková sada má velmi podobné napětí jako 12V olověný akumulátor. [10]

Posledním používaným článkem na bázi lithia je akumulátor lithium-titanový (zkráceně LTO). Katoda je vyrobena ze stejného materiálu jako u akumulátorů Li-ion a Li-pol ovšem anoda je vyrobena z oxidu titanu. Mezi hlavní výhody patří extrémně vysoké nabíjecí a vybíjecí proudy. Výborně zvládají provoz při snížených pracovních teplotách a mají velmi dlouhou cyklickou životnost. Nevýhodou je však malá energetická hustota. To znamená, že tyto akumulátory mají největší hmotnost při stejné kapacitě jako ostatní lithiové akumulátory. [10]

## **3.2.3 Baterie na bázi niklu**

### **3.2.3.1 Nikl-kadmiové akumulátory**

U moderních Nikl-kadmiových akumulátorů (zkráceně NiCd) je kladná elektroda zpravidla tvořena niklem a záporná elektroda kadmíem. Jako elektrolyt slouží hydroxid draselný rozpuštěný ve vodě. Mezi elektrody je vložen separátor, který odděluje kladné elektrody od záporných, a dále také váže v sobě elektrolyt. Pokud dojde k nabití akumulátory na plnou kapacitu a nabíjení stále pokračuje, dochází

k přebíjení akumulátoru. Během přebíjení začne docházet k rozkladu elektrolytu, což má za přímý následek elektrolýzu vody. Během ní se začnou uvolňovat plyny vodíku a kyslíku. U otevřených akumulátorů tyto plyny uniknou do atmosféry, u hermeticky uzavřených akumulátorů dochází k vázání kyslíku na záporné elektrodě. Během nabíjení jako produkt vzniká kadmium, které oxiduje se vznikajícím vodíkem. Tímto způsobem je zabráněno přebití akumulátoru. Další dodávaná energie se mění na teplo, které zahřívá akumulátor.

Mezi výhody Nikl-kadmiových akumulátorů patří odolnost vůči přebíjení a hlubokému vybíjení. Dokonce zvládají stav úplného vybití po dlouhou dobu při zachování stejné kapacity. Dále výborně odolávají provozu v extrémních klimatických podmínkách (pracují v teplotním rozmezí od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ ). S tímto také souvisí dlouhá životnost a vysoká spolehlivost provozu. Dobře zvládají velké vybíjecí a nabíjecí proudy. Při vybíjení mají relativně stálou hodnotu napětí, takže zařízení může pracovat při relativně konstantním výkonu. Mají výborné mechanické vlastnosti a výbornou odolnost proti nárazům a vibracím. Jako nevýhoda se jeví relativně menší kapacita na jednotku hmotnosti než u lithiových akumulátorů. Na konci vybíjení náhle poklesne napětí, i když akumulátor není zcela vybit. Proto nelze určovat kapacitu měřením napětí. Další nevýhodou je nutnost nabíjení akumulátoru při jeho úplném vybití. Akumulátor také obsahuje kadmium, které je považováno za látku toxickou a tudíž škodlivou pro životní prostředí. [12]

### **3.2.3.2 Nikl-metal-hydridové akumulátory**

Princip funkce se velmi podobá Nikl-kadmiovým článkům, ovšem jsou zde patrné některé rozdíly. Kladná elektroda je tvořena niklem a elektrolyt je hydroxid draselný rozpuštěný ve vodě. Záporná elektroda je tvořena speciální kovovou slitinou z niklu, manganu, kobaltu a případně hliníku nebo jiného vzácného kovu. Tato slitina během nabíjení vodík váže a při vybíjení uvolňuje. V průběhu přebíjení se začne uvolňovat kyslík z kladné elektrody, který prochází přes porézní separátor k elektrodě záporné. Tam dochází k jeho redukci a zároveň se zamezuje vzniku vodíkových plynů. Díky této reakci se může akumulátor typu NiMH uzavřít do hermetického pouzdra.

Výhody akumulátoru NiMH jsou především ve zvětšení kapacity při stejném objemu jako u akumulátorů typu NiCd. Dále jsou oproti NiCd akumulátorům šetrnější vůči životnímu prostředí, protože neobsahují toxické a nebezpečné kadmium. Zvládají mimo jiné i vysoké vybíjecí a nabíjecí proudy. Po celou dobu vybíjení udržují relativně stejné napětí a lze je nabíjet při jakémkoli stavu vybití. Relativně výhodná se zdá také jejich cena a dlouhá životnost. Nevýhodou je menší teplotní rozsah a mechanická odolnost. Dále jsou náchylné na přebíjení a trpí poměrně velkým samovybíjením (v dnešní době existují speciální akumulátory,

kteřé samovybíjení minimalizují). Při ponechání akumulátoru v nenabitém stavu se krátí jeho životnost. Jsou mírně dražší ve srovnání s akumulátory NiCd. [13]

### 3.2.4 Srovnání baterií

Pro výběr vhodného typu baterie je nutné vzít v potaz několik faktorů. Jelikož se bude jednat o baterii pro pohon, bude důležitým faktorem při výběru hmotnost. Hmotnost však také velmi závisí na celkové kapacitě akumulátoru. Proto je vhodným porovnávacím parametrem tzv. měrná energie. Ta udává podíl výkonu a hmotnosti akumulátoru. Další důležitým faktorem je jmenovité napětí baterie. To musí odpovídat jmenovitému napětí motoru, který bude pohánět vozík. Jelikož se samotné napětí článků pohybuje okolo 1,2 V až 3,7 V, je nutné spojit několik článků dohromady tak, aby dosáhly požadovaného napětí. Neméně důležitým faktorem je pak velikost vybíjecího proudu. Motor totiž při rozběhu bude odebírat větší proud, než je hodnota jeho jmenovitého proudu. Velikost vybíjecího proudu závisí přímo na kapacitě a kapacita zase na ceně. Proto je vhodné volit akumulátory s nižší kapacitou, ale s vyšším vybíjecím proudem. Dalším důležitým parametrem akumulátorů je také počet nabíjecí respektive vybíjecích cyklů. Jelikož se předpokládá, že vozík bude sloužit několik hodin týdně, není potřeba u akumulátorů požadovat vysokou cyklickou životnost. V neposlední řadě je nutné taky brát ohled na mechanickou odolnost a odolnost vůči atmosférickým vlivům. Mechanická odolnost je výhodná, poněvadž bude vozík sloužit v terénním prostředí s velkým počtem nerovností, kde hrozí poškození akumulátoru. Případná malá odolnost akumulátoru se dá zlepšit použitím ochranného pouzdra. Důležitější je však odolnost vůči atmosférickým vlivům. Předpokládá se, že vozík bude provozován při teplotě v rozmezí od +5°C do +30°C. Při odstavení vozíku v nevytápěném prostoru bude muset být baterie z vozíku vyjmuta a uložena do vytápěného prostoru, aby si zachovala svoji životnost.

Souhrnná tabulka představuje vybrané vlastnosti všech představených akumulátorů.



**Tabulka 3.2: Porovnání některých parametrů vybraných typů akumulátorů [14]**

| <b>Typ</b>                             | <i>Cena</i> | <i>Měrná energie</i> | <i>Vybíjecí proud<sup>1</sup></i> | <i>Počet cyklů</i>   | <i>Mechanická odolnost</i> |
|--|-------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| <b>Olověné - zaplavené údržbové</b>    | Nízká       | 30 - 50 Wh/kg        | Krátkodobě více než 10 C          | 12 - 15              | Průměrná                   |
| <b>Olověné - zaplavené bezúdržbové</b> | Nízká       | 30 - 50 Wh/kg        | Krátkodobě více než 10 C          | 150 - 200            | Průměrná                   |
| <b>Olověné - AGM</b>                   | Střední     | 30 - 50 Wh/kg        | Krátkodobě více než 10 C          | 150 - 200            | Výborná                    |
| <b>Olověné - Gel</b>                   | Vysoká      | 30 - 50 Wh/kg        | Krátkodobě více než 10 C          | 150-200 <sup>2</sup> | Průměrná                   |
| <b>Li-ion</b>                          | Vysoká      | 100 - 160 Wh/kg      | 1 C - 10 C                        | 500 - 1000           | Nízká                      |
| <b>Li-pol</b>                          | Vysoká      | 130 - 200 Wh/kg      | Více než 10 C                     | 300 - 700            | Nízká                      |
| <b>NiCd</b>                            | Nízká       | 45 - 80 Wh/kg        | Více než 1 C                      | 1000                 | Výborná                    |
| <b>NiMH</b>                            | Střední     | 60 - 120 Wh/kg       | 1 C                               | 300 - 500            | Průměrná                   |

Tabulka 3.2 udává základní přehled parametrů různých typů akumulátorů. Je však nutno podotknout, že všechny uvedené hodnoty platí pro nejpoužívanější typy akumulátorů. Na trhu se objevuje mnoho speciálních akumulátorů s lepšími či horšími vlastnostmi, než udává tabulka 3.2.

Při následujícím srovnání měrné energie je vidět, že nejmenší hodnotu dosahují olověné akumulátory, dále pak NiCd a NiMH. V praktickém důsledku to znamená, že budou mít větší hmotnost při stejné kapacitě jako například akumulátory na bázi lithia. Nelze však uvažovat správné baterii pouze na základě její hmotnosti. Snížená váha by byla výhodná, ale je třeba brát ohledy i na další parametry.

Důležité je také velikost vybíjecího proudu. Z tabulky je vidět, že nejmenší vybíjecí proudu mají akumulátory Li-ion a NiMH. V praxi by to znamenalo, pokud by motor odebíral proud např. 20 A, akumulátor by musel mít kapacitu 20 Ah. To by znamenalo vysoké investiční náklady a navíc přemrštěnou kapacitu akumulátoru. Jak již však bylo zmíněno dříve, hodnoty v tabulce nezahrnují speciální typy akumulátorů. Proto je možné se setkat se speciálními typy akumulátorů Li-ion a NiMH s vyššími vybíjecími proudy. S vyššími vybíjecími proudy jsou schopny pracovat i olověné a Li-pol akumulátory.

<sup>1</sup> Vybíjecí proud se udává jako násobek kapacity akumulátoru C

<sup>2</sup> Při použití v záložním zdroji vydrží v provozu 5 až 10 let

Jak již bylo řečeno, počet nabíjecích cyklů nehraje v pohonu pro užitkový vozík důležitou roli. Předpokládá se provoz několik desítek minut týdně, proto nebude nutné časté nabíjení. Tento fakt dále umožní snížení velikosti potřebné kapacity. V tabulce 3.2 je počet nabíjecích cyklů uveden pouze pro orientaci a porovnání.

Z ekonomického hlediska se nejvýhodněji jeví použití olověných zaplavených údržbových i bezúdržbových a NiCd akumulátorů. Do střední cenové kategorie spadají akumulátory olověné s technologií AGM a akumulátory NiMH. Mezi cenově nepříznivé lze zařadit olověné akumulátory s gelovým elektrolytem a všechny akumulátory na bázi lithia.

Odolnost vůči atmosférickým vlivům v tabulce 3.2 není uvedena a to z toho důvodu, že rozsah pracovních teplot se bude pohybovat od +5°C do +30°C. To znamená, že vůči těmto klimatickým podmínkám jsou jistým způsobem odolné všechny typy uvedených akumulátorů. Za to je však v tabulce 3.2 uvedena mechanická odolnost. Lze vidět, že nejlépe odolné jsou akumulátory typu NiCd a olověný akumulátor s technologií AGM. Ostatní olověné akumulátory (zaplavené údržbové, zaplavené bezúdržbové a gelové) jsou taktéž odolné, ovšem platí u nich přísné podmínky pro převoz. Tyto akumulátory obsahují totiž elektrolyt v tekuté formě, a tudíž při neopatrné manipulaci či v případě mechanického poškození hrozí jeho vylití. Jelikož baterie budou sloužit pro pohon vozíku, je nutné se těmito pravidly řídit. Dalším méně odolným typem jsou baterie s technologií NiMH. Baterie na bázi lithia jsou nejméně odolné vůči mechanickému poškození. Akumulátor totiž pracuje s lithiem, které při styku se vzduchem a vzdušnou vlhkostí reaguje a degraduje. V krajním případě hrozí i vznícení akumulátoru a jeho okolí. Proto je nutné tyto akumulátory před poškozením chránit například ochranným pouzdrem.

Napětí samotných článků se pohybuje v rozmezí 1,2 V až 3,7 V, a to pro napájení motoru se jmenovitým napětím 12 V nebo 24 V nestačí. Proto je většina takových článků uspořádaných do tzv. „battery packs“, které spojují několik článků dohromady tak, aby bylo dosaženo požadovaného napětí. Tento „battery pack“ však vyžaduje pro bezvadnou funkci řídicí elektroniku, která se promítne v ceně a ve zvýšeném samovybíjení akumulátoru. Zároveň však zajistí odstavení akumulátoru před úplným vybitím, a tedy zabrání zničení článků (kromě akumulátorů typu NiCd). Takovou řídicí elektroniku vyžadují akumulátory typu Li-ion, Li-pol, NiMH a někdy i NiCd. Olověné akumulátory si vystačí s pouhým propojením článků uvnitř nádoby.

### 3.2.5 Výběr baterie

V první řadě lze z výběru vyloučit všechny typy olověných akumulátorů, a to i vzhledem k jejich dobré cenové dostupnosti. Jejich největším nedostatkem je hmotnost a velké rozměry. Dalším nepříznivým faktorem pro použití v pohonu je tekutý elektrolyt (u olověných baterií typu AGM tekutý elektrolyt není), u kterého hrozí vylití.

Akumulátory NiCd se jeví jako vhodné akumulátory především díky své velmi dobré mechanické odolnosti. Lze je provozovat až do stavu úplného vybití, a také je tak skladovat, aniž by se zkrátila životnost akumulátoru. Také dobře zvládají cyklickou zátěž a vysoké vybíjecí proudy. Mezi nevýhody patří především to, že tyto akumulátory dosahují velké hmotnosti při nízké kapacitě článku v porovnání s ostatními typy uvedených baterií. Lze je nabíjet až po úplném vybití, jinak ztrácí svou kapacitu. Napětí jednoho článku dosahuje 1,2 V, což znamená, že pro sestavení „battery packu“ s vyšším napětím než 12 V by bylo potřeba alespoň deset článků. To se velmi nepříznivě projeví na hmotnosti celého „battery packu“ a také jeho ceně.

Dalším méně vhodným typem je akumulátor na bázi NiMH. Hlavním důvodem je malá mechanická odolnost, malá měrná energie v článku a relativně nízký vybíjecí proud. Další nevýhodou je i horší dostupnost v napěťové hladině vyšší než 12 V, protože napětí na jednom článku dosahuje hodnoty 1,2 V. To se projeví na hmotnosti a ceně baterie. Dále baterie špatně zvládají stav vybití a nejsou schopny dodávat vysoké vybíjecí proudy. Mezi výhody patří zejména vyšší měrná energie na kilogram oproti NiCd akumulátorům.

Vhodnými typy baterií se jeví akumulátory na bázi Li-pol. Mezi velké přednosti těchto akumulátorů patří nejvyšší hodnota měrné energie na kilogram. To znamená, že tyto akumulátory mají nejmenší hmotnost při stejné kapacitě jako ostatní uvedené akumulátory. Dále tyto akumulátory dosahují velmi vysokých hodnot vybíjecího proudu. Jelikož jsou tyto typy akumulátorů hojně zastoupeny v modelářské technice, jsou tedy dostupnější a cenově příznivější. Mezi nevýhody těchto článků patří malá mechanická odolnost a nelze je provozovat při mrazech, kdy ztrácí polovinu své kapacity. I když akumulátor není v provozu, časem degraduje a ztrácí kapacitu. Přesto je však jako zdroj energie pro pohon vozíku lze použít.

Další vhodným typem jsou akumulátory Li-ion. Výhodou těchto akumulátorů je, že mají vysokou hodnotu měrné energie na kilogram a tudíž i nízkou hmotnost. Dále je tento typ akumulátoru výhodný zejména kvůli své dlouhé životnosti a cenové dostupnosti. Mezi nevýhody lze zařadit špatnou mechanickou odolnost, poměrně velké samovybití a neschopnost pracovat při

velmi nízkých teplotách. Dále jsou tyto akumulátory velmi náchylné na přebíjení a stav úplného vybití, kdy ztrácí většinu své kapacity.

### **3.3 Požadavky na přenos momentu na poháněné kolo**

Převodovka bude zajišťovat přenos momentu z motoru na poháněné kolo. S jejím použitím bude také možno využít vysokootáčkový motor, který bude mít při těchto otáčkách malý moment. Transformací tohoto momentu při vysokých otáčkách na nízké otáčky, mohutně vzroste moment ovšem za cenu snížení otáček. Což je žádoucí, jelikož vozík se bude pohybovat rychlostí lidské chůze cca 5 kmh<sup>-1</sup>. Další výhodou bude to, že motor nebude muset přímo vyvinout vysoký moment, a tudíž nebude mít takové rozměry a bude lehčí. Realizaci převodovky lze provést několika způsoby. [3]

#### **3.3.1 Možnosti řešení přenosu momentu na poháněné kolo**

##### **3.3.1.1 Řemen**

Jednoduchý převod lze realizovat pomocí hladkého řemene s použitím řemenic. Tento způsob však nezajišťuje ideální adhezi řemene a řemenice. Při velkém záběrném momentu dojde k prokluzu a poháněcí kolo se nezačne otáčet. Další nepříznivou okolností prokluzu je rychlé opotřebení řemene. Řešení by mohlo přinést použití ozubeného řemene. Adheze by se rapidně zvýšila, ovšem řemen nezaručí přenos velkého momentu a hrozí jeho roztrhnutí. Obě tyto řešení jsou ekonomicky výhodná. [3]

##### **3.3.1.2 Řetěz**

Další možností realizace převodovky je použití ozubených kol s řetězem. Toto řešení nabízí velkou adhezi, ovšem při přenosu momentu opět hrozí přetrhnutí řetězu. Další nevýhodou je potřebná údržba řetězu, který vyžaduje mazání olejem. Toto řešení je ovšem ekonomicky výhodné. [3]

##### **3.3.1.3 Ozubené kola**

Poslední nabízenou variantou je použití převodu pomocí ozubených kol. Tato volba opět nabízí vysokou adhezi a zároveň velkou pevnost při přenášení momentu. Ozubená kola by na tento výkon musel být vyrobena z kovového materiálu. V úvahu přichází použití pouze kovových ozubených kol. Nevýhodou při použití ozubených kol je ta, že je potřeba přesný počet zubů na obou kolech, což si žádá zakázkovou výrobu. Převod pomocí ozubených kol se tedy ekonomicky nevyplatí. [3]

## 4 KONKRÉTNÍ PRVKY POHONU

### 4.1 Motor

Z kapitoly 3.1.6 je známo, že nejvýhodnějším motorem z pohledu ekonomického by byl stejnosměrný motor, a to bez nebo s permanentními magnety. Navíc tyto typy motorů jsou poměrně dobře dostupné na trhu jak českém, tak mezinárodním. Velikost potřebného výkonu motoru je známa z kapitoly 2.4 a pohybuje se v rozmezí od 150 W do 250 W. Velikost napájecího napětí by měla dosahovat hodnoty 24 V anebo vyšší. Dále by motor měl disponovat převodovkou pro snížení otáček hřídele. Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje motor typu MY1016Z.

#### 4.1.1 Stejnosměrný motor typu MY1016Z



Obrázek 4.1: Stejnosměrný motor typu MY1016Z

Jedná se o stejnosměrný kartáčový motor s permanentními magnety a vestavěnou převodovkou. Motor je konstruován pro použití v elektrických kolech, elektrických skútrech a jiných elektrických vozících. Pro tyto účely má v sobě zabudovanou převodovku s převodovým poměrem 9,78 : 1. Výstupní hřídel je osazena pastorkem o devíti zubech s roztečí 12,7 mm. Vnější průměr pastorku je 41 mm s tloušťkou zubů 3 mm. Jmenovité napájecí napětí dosahuje hodnoty 24 V. Výstupní výkon motoru činí 250 W, což odpovídá potřebnému výkonu. Při plném zatížení motor odebírá proud 13,4 A. Jelikož je motor osazen permanentními magnety, lze řídit jeho otáčky pouze změnou napětí na kotvě. Hmotnost motoru dosahuje 2,5 kg.

Parametry motoru jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 4.1: Parametry motoru MY1016Z [15]**

|                                   |          |                                     |                       |
|-----------------------------------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| <i>Jmenovité napětí</i>           | 24 V     | <i>Otáčky na hřídeli bez zátěže</i> | 421 min <sup>-1</sup> |
| <i>Jmenovitý výkon na hřídeli</i> | 250 W    | <i>Jmenovité otáčky na hřídeli</i>  | 357 min <sup>-1</sup> |
| <i>Maximální výkon na hřídeli</i> | 380,7 W  | <i>Otáčky na hřídeli při zátěži</i> | 315 min <sup>-1</sup> |
| <i>Jmenovitý proud</i>            | ≤ 13,4 A | <i>Jmenovitý moment na hřídeli</i>  | 6,65 Nm               |
| <i>Maximální proud</i>            | ≤ 21,9 A | <i>Maximální moment na hřídeli</i>  | 11,5 Nm               |
| <i>Účinnost motoru</i>            | ≥ 78 %   | <i>Váha</i>                         | 2,5 kg                |
| <i>Převodový poměr</i>            | 9,78 : 1 | <i>Rozměry v cm</i>                 | 37 x 32 x 26          |

Motor vyrábí společnost Yueqing Onlybo Instruments Co. se sídlem v Číně. Motor je velmi dobře dostupný, zvláště na mezinárodním trhu. Lze ho také pořídit na českém trhu, ovšem za vyšší náklady. [16]

## 4.2 Baterie

Akumulátory typu Li-ion a Li-pol jsou podle kapitoly 3.2.5 nejvhodnější pro pohon vozíku. Parametry baterie bude převážně záviset na vlastnostech motoru. Především je to jmenovité napětí motoru 24 V a hodnota maximálního záběrného proudu 21,9 A. Kapacita akumulátoru pak bude záviset na časovém úseku provozu.

### 4.2.1 Lithium-iontová baterie 7S3P 18650

Jako nejvhodnější baterie se jeví použití akumulátoru typu 7S3P 18650 výrobce XSL se sídlem v Číně. Jedná se o battery pack tvořený osmi jednotlivými články na bázi technologie lithium-iont. Napětí akumulátoru se pohybuje v rozmezí od 21 V do 29,4 V a závisí na stavu nabití. Hodnota pracovního proudu dosahuje 45 A a hodnota maximálního krátkodobého proudu 60 A, což vyhovuje požadavkům motoru. Kapacita akumulátoru je 6 Ah a zvolena s ohledem na cenu akumulátoru. Tato kapacita zároveň vystačí pohánět vozík několik desítek minut. Nabíjení akumulátoru probíhá sníženým proudem 4 A speciální nabíječkou. Jednotlivé články jsou propojeny řídicí elektronikou, která chrání před spojením do zkratu a vysokými nabíjecími a vybíjecími proudy. Rozměry battery packu jsou 130 x 60 x 70 mm a jeho hmotnost činí 1 kg. [17]

**Tabulka 4.2: Parametry baterie 7S3P 18650 [17]**

|  |                  |
|--|------------------|
| <i>Jmenovité napětí</i>                    | 24 V             |
| <i>Napětí na výstupu</i>                   | 21 V – 29,4 V    |
| <i>Jmenovitý výstupní proud</i>            | 45 A             |
| <i>Maximální krátkodobý výstupní proud</i> | 60 A             |
| <i>Jmenovitý nabíjecí proud</i>            | 4 A              |
| <i>Kapacita</i>                            | 6 Ah             |
| <i>Hmotnost</i>                            | 1 kg             |
| <i>Rozměry</i>                             | 130 x 60 x 70 mm |
| <i>Ochranná elektronika</i>                | Ano              |

### 4.3 Přenos momentu na poháněcí kolo

Přenos momentu na poháněcí kolo bude uskutečněn řetězovým převodem, a to z toho důvodu, že na výstupní hřídeli motoru je ozubené kolo uzpůsobené pro řetěz. Pastorek má devět zubů s roztečí 12,7 mm a tloušťkou 3 mm. Tento rozměr se hodí pro řetěz z obyčejného jízdního kola. Na poháněcím kole bude muset být umístěno větší ozubené kolo, které zredukuje otáčky motoru na otáčky odpovídající rychlosti 5 kmh<sup>-1</sup>. Pro zjištění průměru a počtu zubů pastorku, který bude spojen s poháněcím kolem je nutno provést výpočet.

#### 4.3.1 Výpočet parametrů ozubeného kola

V první řadě je nutno zjistit úhlovou rychlost pastorku motoru  $\omega_m$ . Ta se určí takto:

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot n_n}{60}, \quad (14)$$

kde  $n_n$  jsou jmenovité otáčky motoru a jejich hodnota je 357 min<sup>-1</sup>. Po dosazení konkrétních hodnot do vzorce je výsledná úhlová rychlost:

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot 357}{60} = 37,38 \text{ rads}^{-1}$$

Dále je nutné určit úhlovou rychlost poháněného kola. Ta se určí takto:

$$\omega_k = \frac{v}{r}, \quad (15)$$

kde  $v$  je rychlost v ms<sup>-1</sup> a  $r$  je poloměr kola. Rychlost kola dosahuje hodnoty 5 kmh<sup>-1</sup> a poloměr je 200 mm. Po dosazení vyjde úhlová rychlost poháněcího kola takto:

$$\omega_k = \frac{v_{m/s}}{r} = \frac{v_{km/h}/3,6}{r} = \frac{5/3,6}{0,2} = 6,94 \text{ rads}^{-1}$$

Z úhlových rychlostí motoru a poháněcího kola lze vypočítat potřebný převodový poměr a to takto:

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_k} \quad (16)$$

Číselně pak:

$$i = \frac{37,38}{6,94} = 5,38$$

Z převodového poměru lze pak dále vypočítat vnější průměr poháněcího pastorku.

$$i = \frac{\omega_m}{\omega_k} = \frac{d_k}{d_m}, \quad (17)$$

kde  $d_m$  je průměr pastorku na hřídeli motoru a  $d_k$  je hledaný průměr hnacího pastorku, který se vypočítá takto:

$$d_k = i \cdot d_m \quad (18)$$

Po dosazení převodového poměru a průměru pastorku platí:

$$d_k = 5,38 \cdot 41 = \underline{\underline{220,5 \text{ mm}}}$$

Lze tedy tvrdit, že průměr hnacího pastorku by měl být 220,5 mm. [3]

### 4.3.2 Výpočet momentu přenášeného na poháněné kolo

Dále je také nutné ověřit, že převod vyvine dostatečný moment pro rozjezd vozíku. Pro výpočet momentu na hnacím kole se vychází z rovnováhy výkonu jak na straně motoru, tak na straně zátěže:

$$M_m \cdot \omega_m = M_k \cdot \omega_k, \quad (19)$$

kde je  $M_m$  je moment motoru a  $M_k$  je moment na hnacím kole. Nutno také podotknout, že do vztahu se započítává i účinnost převodu. Ovšem v tomto případě účinnost převodu je neznámá a navíc se tato účinnost většinou pohybuje v rozmezí od 95 % do 99 %, takže ji lze zanedbat. Následnou úpravou vztahu lze vyjádřit vztah pro moment na poháněném kole:

$$M_k = M_m \cdot i \quad (20)$$

Z kapitoly 4.1.1 je známo, že maximální moment motoru dosahuje 11,5 Nm. Nyní lze do vztahu (20) číselně dosadit:

$$M_k = 11,5 \cdot 5,38 = \underline{\underline{62,68 \text{ Nm}}}$$

V kapitole 2.5 byl vypočítán potřebný momentu pro rozjezd vozíku a to 46,98 Nm. Při porovnání je zřejmé, že motor s použitým převodem vyvine vyšší moment, než je požadován. [3]



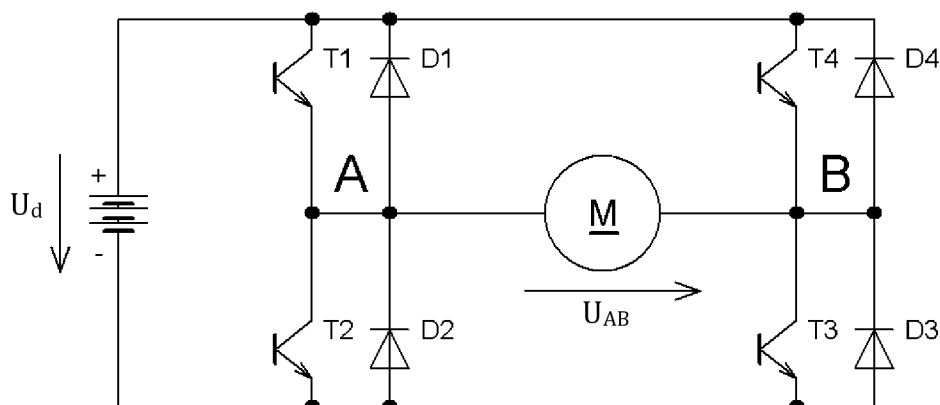
## 5 REGULÁTOR MOTORU

Základní požadavek na měnič je ten, aby dokázal nejen vozík pohánět vpřed, ale i při jízdě z kopce dokázal vozík brzdit. Z tohoto požadavku vyplývá, že tranzistorový pulsní měnič musí zvládnout minimálně jednu polaritu napětí a oba směry proudu. Další požadavkem na měnič pro tuto aplikaci je možnost reverzace motoru, neboli aby motor zvládl oba směry otáčení. Reverzaci lze docílit dvěma způsoby. První způsob spočívá v prohození polarity napětí na svorkách motoru mechanickým přepínačem. Druhý způsob lze realizovat pomocí měniče, který bude složen ze čtyř spínačů (čtyřkvadrantový měnič). Znamená to tedy, že měnič umí pracovat jednak s oběma polaritami napětí, tak s oběma směry proudů.

Jelikož motor bude dosahovat maximálního proudu 20 A a více, lze variantu s mechanickým reverzním přepínačem vyloučit. Přepínač pro tak vysoké proudy nejsou ekonomicky výhodné. Proto bude výhodnější, realizovat reverzaci pomocí čtyřkvadrantového pulsního měniče.

### 5.1 Čtyřkvadrantový tranzistorový pulsní měnič

Čtyřkvadrantový tranzistorový pulsní měnič je schopen dodávat na výstupu obě polarity napětí a oba směry proudů. Znamená to tedy, že motor je schopen chodu vpřed i vzad a zároveň dokáže motor akcelarovat i brzdit. Na obrázku 5.1 je naznačeno zjednodušené schéma čtyřkvadrantového měniče napájeného z baterií.

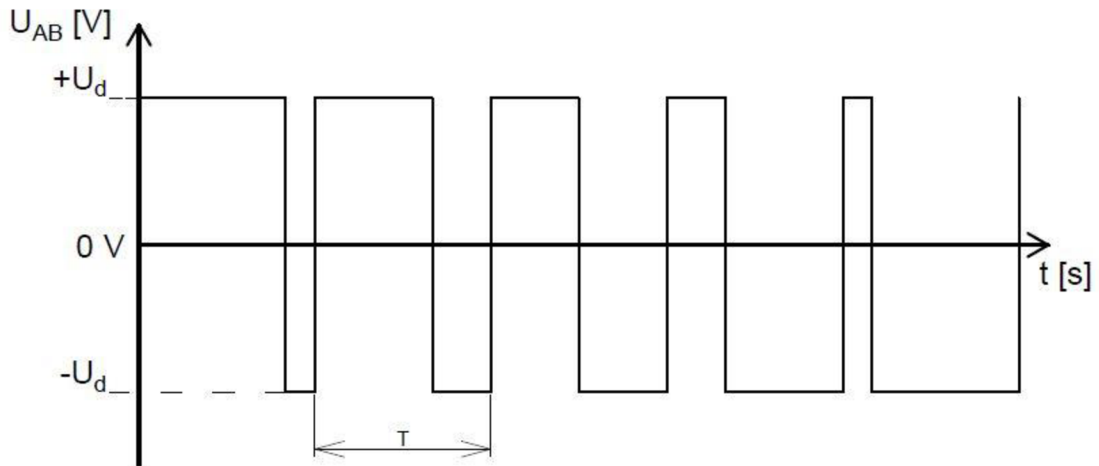


Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma čtyřkvadrantového měniče, převzato z [18] a upraveno autorem

Jedná se o měnič napěťový, tj. je napájen ze zdroje napětí v tomto případě z baterie. Řízení měniče zajišťuje řídicí logika pracující na principu pulsní šířkové modulace (PWM), která spíná jednotlivé tranzistory v úhlopříčkách. Podle časové posloupnosti spínání jednotlivých tranzistorů v úhlopříčkách lze rozdělit řízení na bipolární a unipolární. [18]

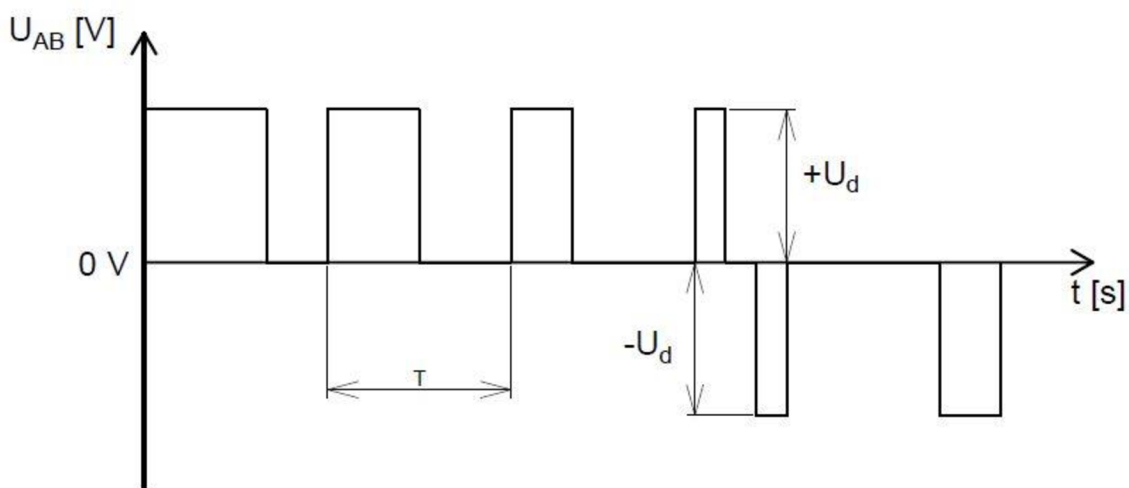
### 5.1.1 Bipolární a unipolární řízení čtyřkvadrantového měniče

Při *bipolárním řízení* jsou během jedné periody na motoru obě polaridy napětí. To se provede tak, že jsou nejprve sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_3$  a po jejich rozeptnutí se sepnou tranzistory  $T_2$  a  $T_4$ . Poměrem doby septnutí se nastavuje směr otáčení motoru. [18]



**Obrázek 5.2: Průběh napětí na svorkách motoru  $U_{AB}$  při bipolárním způsobu řízení, převzato z [18] a upraveno autorem**

*Unipolární řízení* spočívá v tom, že na motoru se objevuje střídavě napětí jedné polaridy nebo nulové napětí. Tohoto stavu se dosáhne tak, že jsou nejprve sepnuty tranzistory  $T_1$  a  $T_3$ . Za dobu  $T/2$  je sepnut tranzistor  $T_2$  a rozeptnut tranzistor  $T_1$ , přičemž tranzistor  $T_3$  zůstává v sepnutém stavu. Motor v tuto chvíli není připojen k potenciálu baterie a na svorkách motoru se objeví nulové napětí. Po době  $T/2$  je rozeptnut tranzistor  $T_2$  a sepnut opět  $T_1$ . Tranzistor  $T_3$  zůstává sepnutý. Následně se rozeptne tranzistor  $T_3$  aby se mohl sepnout tranzistor  $T_4$  (tranzistor  $T_1$  je stále sepnut). Opět se na motoru objeví napětí nulové polaridy, jelikož není na ani jednu svorku motoru připojen potenciál baterie. [18]



**Obrázek 5.3: Průběh napětí na svorkách motoru  $U_{AB}$  při unipolárním způsobu řízení, převzato z [18] a upraveno autorem**

Při porovnání obou režimů řízení je patrné, že unipolární řízení má oproti bipolárnímu určité výhody. Během unipolárního způsobu řízení dochází ke zdvojování spínací frekvence, což snižuje zvlnění proudu motorem a také zmenšuje akustický hluk. Toto dvojnásobné zvýšení frekvence může být také využito ke snížení spínací frekvence tranzistorů, což zmenší přepínací ztráty na tranzistorech. Další výhodou je to, že při stejné střední hodnotě napětí  $U_z$  je efektivní hodnota napětí  $U_{z,ef}$  rovna:

$$U_{z,ef} = U_z \cdot \sqrt{s} \quad (21)$$

Z rovnice je patrné, že efektivní hodnota napětí  $U_{z,ef}$  při unipolárním způsobu řízení je závislá na střídě. Při bipolárním řízení je střední hodnota napětí  $U_z$  rovna efektivní hodnotě napětí  $U_{z,ef}$ . Z toho vyplývá, že při unipolárním způsobu řízení vznikají na motoru vždy menší ztráty vířivými proudy (jsou závislé na efektivní hodnotě napětí  $U_{z,ef}$ ), než u řízení bipolárního. Totéž platí o střední hodnotě a efektivní hodnotě proudu mezilehlého obvodu.

Výhoda bipolárního řízení spočívá v tom, že se ve vedení proudu téměř neuplatňují nulové diody. Proto lze při výpočtu tepelného odporu chladiče tyto ztráty zanedbat. [18]

### 5.1.2 Možnosti realizace řídicí logiky čtyřkvadrantového měniče

Řízení čtyřkvadrantového měniče lze realizovat mnoha způsoby. Mezi nejjednodušší způsob řízení patří realizace logiky pomocí diskrétních součástek a analogových integrovaných obvodů. Tato realizace však zahrnuje mnoho externích obvodů, které by zvětšovaly desku plošného spoje. Měnič lze také řídit sofistikovaně pomocí mikroprocesoru a speciálního obvodu pro buzení tranzistorů. Tato varianta je ovšem ekonomicky náročná a vyžaduje pokročilou

znalost programování integrovaných obvodů. Jako neoptimálnější varianta se jeví použití speciálního integrovaného obvodu přímo určeného k řízení čtyř kvadrantového měniče pro stejnosměrný motor. V kombinaci s několika externími obvody lze realizovat levný měnič s malou plochou DPS.

## 5.2 Návrh výkonových prvků

### 5.2.1 Parametry motoru

Požadavky na silovou část měniče vycházejí z parametrů motoru. Parametry motoru udávané výrobcem jsou v následující tabulce.

**Tabulka 5.1: Některé parametry stejnosměrného motoru**

|                                   |               |                                    |               |
|-----------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|
| <i>Jmenovité napětí</i>           | 24 V          | <i>Maximální proud</i>             | $\leq 21,9$ A |
| <i>Jmenovitý výkon na hřídeli</i> | 250 W         | <i>Účinnost motoru</i>             | $\geq 78$ %   |
| <i>Maximální výkon na hřídeli</i> | 380,7 W       | <i>Jmenovitý moment na hřídeli</i> | 6,65 Nm       |
| <i>Jmenovitý proud</i>            | $\leq 13,4$ A | <i>Maximální moment na hřídeli</i> | 11,5 Nm       |

Důležitým parametrem je také hodnota zvlnění proudu. Ta závisí na spínací frekvenci a indukčnosti vinutí motoru. Zvlnění proudu nepříznivě zvyšuje ztráty ve vinutí motoru, způsobuje pulsaci momentu motoru a také nepříjemné akustické projevy. Maximální zvlnění proudu při dané frekvenci nastane při střídě  $s = 0,5$  a tedy platí:

$$\Delta I_{max} = \frac{U_d}{4 \cdot f_{PWM} \cdot L} \quad (22)$$

kde  $\Delta I_{max}$  je hodnota proudu špička – špička,  $f_{PWM}$  je spínací frekvence tranzistorů, která činí  $f_{PWM} = 20$  kHz a  $L$  je indukčnost vinutí motoru. Hodnotu indukčnosti vinutí výrobce neudává, a proto bylo nutné ji stanovit měřením. Indukčnost vinutí motoru tedy činí  $L = 0,5$  mH. Nyní již lze do vztahu (22) číselně dosadit.

$$\Delta I_{max} = \frac{24}{4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,6 \text{ A}$$

Hodnota zvlnění proudu  $\Delta I_{max}$  je relativně nízká, jelikož nedosahuje ani hodnoty 10 % proudu jmenovitého. [18]

### 5.2.2 Návrh parametrů tranzistorů

Pro návrh tranzistorů jsou nejdůležitějšími parametry velikost maximálního proudu motoru a velikost jmenovitého napětí.

Při vypnutí tranzistoru dojde k chvilkovému přepětí v obvodu měniče. Proto je nutné, aby tranzistor i nulová dioda snesly v závěrném směru minimální napěťový impulz dvakrát větší než provozní napětí. V tomto případě musí být

tranzistory dimenzovány na napětí alespoň 48 V. Z parametrů baterie vyplývá, že napětí může dosáhnout vyšší hodnoty než je uvedena jmenovitá. Proto je vhodné tranzistorům přidat napěťovou rezervu.

Pro proudové dimenzování hraje největší roli špičkový, trvale opakovatelný kolektorový proud. Ten se značí  $I_{Cmax}$  a je roven:

$$I_{Cmax} = I_Z, \quad (23)$$

kde  $I_Z$  je maximální hodnota proudu v obvodu. V první řadě lze uvažovat maximální proud motoru 21,9 A. Na tomto proudu závisí maximální moment motoru na hřídeli 11,5 Nm. Z kapitoly 4.3.2 je zřejmé, že motor vyvine mnohem vyšší moment, než je požadován. Tudíž lze tento proud snížit na hodnotu 20 A, aniž by došlo k poklesu momentu pod potřebnou úroveň. Proto lze nyní uvažovat, že proud  $I_Z$  je roven 20 A. Číselně tedy:

$$I_Z = 20 \text{ A}$$

Tento proud musí snést tranzistor i nulová dioda. [18] Také je doporučeno, aby tranzistory byly dimenzovány s proudovou rezervou. Výhodné je to především při průchodu proudu, kdy dochází ke snížení tepelných ztrát vedením.

### Výběr tranzistorů

Jelikož v obvodu bude relativně nízké napětí 24 V, lze jako horní spínač použít tranzistor typu MOS-FET s kanálem P a jako dolní spínač tranzistor MOS-FET s kanálem typu N.

Vzhledem k těmto požadavkům byly vybrány tranzistory typu P (IRF4905) a tranzistory typu N (IRFZ44). V následující tabulce jsou uvedeny parametry těchto tranzistorů.

**Tabulka 5.2: Parametry zvolených tranzistorů [19] [20]**

| Parametr                        |                 | IRF4905 – typ P                  | IRFZ44 – typ N                  |
|---------------------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Závěrné napětí                  | $U_{DS}$        | -55 V                            | 60 V                            |
| Kolektorový proud               | $I_{DS}$        | -74 A                            | 50 A                            |
| Odpor kanálu                    | $R_{DS}$        | 0,02 $\Omega$                    | 0,028 $\Omega$                  |
| Doba zapnutí                    | $t_{zap}$       | 117 ns                           | 124 ns                          |
| Doba vypnutí                    | $t_{vyp}$       | 157 ns                           | 137 ns                          |
| Tepelný odpor čip – pouzdro     | $R_{\theta jc}$ | 0,75 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ | 1 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$   |
| Tepelný odpor pouzdro - chladič | $R_{\theta ch}$ | 0,5 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  | 0,5 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |

#### 5.2.2.1 Ztráty na tranzistorech

Ztráty na tranzistoru vznikají dvojím způsobem. Při vedení proudu a to proto, že dráha kolektor - emitor má v sepnutém stavu určitý odpor. Tyto ztráty se nazývají ztráty vedením. Druhým typem ztrát jsou ztráty přepínací, které vznikají při

zapínání a vypínání tranzistoru. Podle velikosti ztrátového výkonu tranzistorů se pak následně dimenzuje chladič.

K výpočtu ztrát je nutné určit efektivní hodnotu kolektorového proudu tranzistorů. Hodnoty jednotlivých proudů jsou počítány při střídě 1, kdy dochází v obvodu k největšímu proudovému zatížení. Nepředpokládá se však, že by tento stav trval delší dobu. Nicméně je možné, že takový stav na krátkou dobu nastane. Efektivní hodnota proudu se tedy vypočítá takto:

$$I_{C,ef} = I_Z \cdot \sqrt{s} \quad (24)$$

Číselně pak:

$$I_{C,ef} = 20 \cdot \sqrt{1} = 20 \text{ A}$$

Ztráty vedením lze určit z tohoto vztahu:

$$\Delta P_{ved} = R_{DS} \cdot I_{C,ef}^2 \quad (25)$$

Číselně pro tranzistor IRF4905:

$$\Delta P_{ved,P} = 0,02 \cdot 20^2 = 8 \text{ W}$$

Číselně pro tranzistor IRFZ44:

$$\Delta P_{ved,N} = 0,07 \cdot 20^2 = 11,2 \text{ W}$$

Pro ztráty přepínáním platí:

$$\Delta P_{přep} = \frac{1}{4} \cdot U_d \cdot I_Z \cdot (t_{zap} + t_{vyp}) \cdot f_{PWM}, \quad (26)$$

kde  $U_d$  je napětí stejnosměrného meziobvodu (baterie) a  $f_{PWM}$  je frekvence spínání tranzistorů. Napětí baterie je 24 V a spínací frekvence činí 20 kHz.

Číselně pro tranzistor IRF4905:

$$\Delta P_{přep,P} = \frac{1}{4} \cdot 24 \cdot 20 \cdot (117 \cdot 10^{-9} + 157 \cdot 10^{-9}) \cdot 20 \cdot 10^3 = 0,66 \text{ W}$$

Číselně pro tranzistor STP24NF10:

$$\Delta P_{přep,N} = \frac{1}{4} \cdot 24 \cdot 20 \cdot (103 \cdot 10^{-9} + 66 \cdot 10^{-9}) \cdot 20 \cdot 10^3 = 0,63 \text{ W}$$

Celkové ztráty tranzistoru jsou pak dány součtem přepínacích ztrát a ztrát vedením v sepnutém stavu. Jelikož se předpokládá spínání jednotlivých tranzistorů v úhlopříčkách komplementárně, lze výkonové ztráty na substrátových diodách zanedbat. Pak platí:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{ved} + \Delta P_{přep} \quad (27)$$

Číselně pak pro tranzistor IRF4905 platí:

$$\Delta P_{celk,P} = 8 + 0,66 = 8,66 \text{ W}$$

Číselně pro tranzistor STP24NF10 platí:

$$\Delta P_{celk,N} = 11,2 + 0,63 = 11,83 \text{ W}$$

V následující tabulce je uveden přehled ztrát pro jednotlivé tranzistory. [18]

**Tabulka 5.3: Přehled ztrát tranzistorů**

| Parametr         |                   | IRF4905 – typ P | IRFZ44 – typ N |
|------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Ztráty vedením   | $\Delta P_{ved}$  | 8 W             | 11,2 W         |
| Ztráty přepínací | $\Delta P_{přep}$ | 0,66 W          | 0,63 W         |
| Celkové ztráty   | $\Delta P_{celk}$ | 8,66 W          | 11,83 W        |

### 5.2.2.2 Výpočet potřebného tepelného odporu chladiče

Při provozu měniče budou v činnosti vždy dva jen tranzistory zároveň. K výpočtu okamžitého ztrátového výkonu lze užít tento vzorec:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{celk,P} + \Delta P_{celk,N} \quad (28)$$

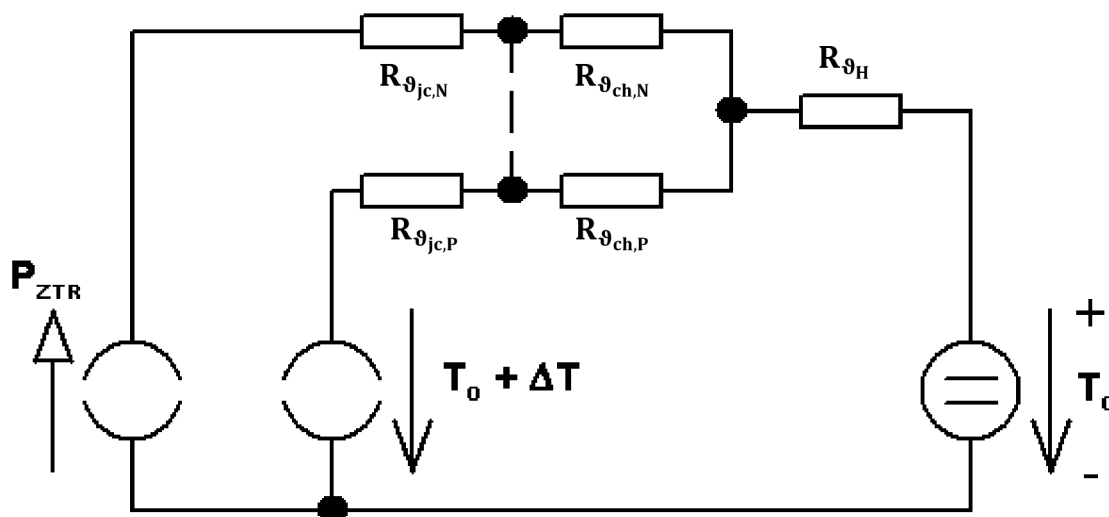
Číselně tedy platí:

$$\Delta P_{tot} = 8,66 + 11,83 = 20,49 \text{ W}$$

Pro výpočet tepelného odporu chladiče  $R_{\vartheta_H}$  platí následující vztah:

$$R_{\vartheta_H} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{tot}} - R_{\vartheta_{jc}} - R_{\vartheta_{ch}}, \quad (29)$$

kde  $\Delta T$  je povolené oteplení tranzistoru (pro křemík platí  $T_{Si} = 120^\circ\text{C}$ ) oproti okolní teplotě  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ,  $R_{\vartheta_{jc}}$  je tepelný odpor mezi vnitřním čipem a pouzdrům součástky a  $R_{\vartheta_{ch}}$  je tepelný odpor mezi pouzdrům a chladičem. Tranzistory jsou rozmístěny na chladiči symetricky a každý tranzistor se nachází ve svém vlastním pouzdrě. Proto se tepelné přechody  $R_{\vartheta_{jc}}$  a  $R_{\vartheta_{ch}}$  jeví jako paralelně spojené. Tepelné schéma dvou aktivních tranzistorů je naznačeno na obrázku 5.4.



**Obrázek 5.4: Tepelné schéma dvou aktivních tranzistorů na společném chladiči**

Hodnoty  $R_{\vartheta_{jc}}$  a  $R_{\vartheta_{ch}}$  jsou získány z tabulky 5.2. Jelikož hodnoty tepelných přechodů  $R_{\vartheta_{jc}}$  tranzistorů se neshodují, lze celkový tepelný odpor vypočítat ze známého vztahu pro výpočet dvou paralelně zapojených rezistorů. Také tepelné

přechody  $R_{\vartheta_{ch}}$  se jeví jako paralelně zapojené, ovšem pro výpočet stačí pouze vydělit hodnotu udávanou výrobcem dvěma. Proto platí tato rovnice:

$$R_{\vartheta_H} = \frac{T_{Si} - T_0}{\Delta P_{tot}} - \frac{R_{\vartheta_{jc,P}} \cdot R_{\vartheta_{jc,N}}}{R_{\vartheta_{jc,P}} + R_{\vartheta_{jc,N}}} - \frac{R_{\vartheta_{ch}}}{2} \quad (30)$$

Číselně tedy:

$$R_{\vartheta_H} = \frac{120 - 40}{20,49} - \frac{0,75 \cdot 1}{0,75 + 1} - \frac{0,5}{2} = 3,22 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Z výsledku je patrné, že bude dostačující chladič s hodnotou tepelného odporu 3,22 °C/W nebo menší. [18]

### 5.2.3 Návrh parametrů kondenzátorů

Při napěťovém dimenzování kondenzátorů je rozhodující napětí meziobvodu. Ten je napájen baterií o jmenovité hodnotě 24 V, ovšem jak je patrné z tabulky 4.2, může se na svorkách baterie objevit vyšší napětí, než 24 V. Proto je vhodné, aby tyto kondenzátory byly schopné pracovat na napěťové hladině větší než 24 V.

Proudové dimenzování závisí především na efektivní hodnotě maximálního odebíraného proudu  $I_{MAX}$ , který odpovídá kolektorovému proudu  $I_z$ . Nejhorší podmínky opět nastávají při střídě 0,5. Pro efektivní proud kondenzátoru platí:

$$I_{Kon,ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_c(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot T \cdot I_{MAX}^2 (s - s^2)} = I_{MAX} \cdot \sqrt{(s - s^2)} \quad (31)$$

Číselně pak platí:

$$I_{Kon,ef} = 20 \cdot \sqrt{(0,5 - 0,5^2)} = 10 \text{ A}$$

Na základě výpočtu byly zvoleny čtyři elektrolytické kondenzátory 1500 µF/35 V s efektivní hodnotou špičkového proudu 2490 mA. Pro eliminaci parazitních kapacit vznikajících na přívodních drátech elektrolytických kondenzátorů je obvod doplněn o osm bezindukčních keramických SMD kondenzátorů každý o kapacitě 2,2 µF na 50 V. [18]

## 5.3 Návrh řídicího obvodu s integrovaným obvodem UC3638

Pro řízení plného můstku byl zvolen integrovaný obvod UC3638 z produkce firmy Texas Instrument. Jedná se o univerzální čip pracující na principu pulzní šířkové modulace využívaný k řízení motorů, zesilovačů nebo jiných aplikací, které vyžadují ke své funkci čtyřkvadrantový měnič.

Klíčovými prvky obvodu UC3638 je rychlý programovatelný generátor trojúhelníkového signálu, komparátor proudového omezení, vysokorychlostní komparátor PWM, dva výstupy s otevřeným kolektorem pro proud až 50 mA poskytující řídicí signál pro horní tranzistory v můstku a dva výstupy pro přímé

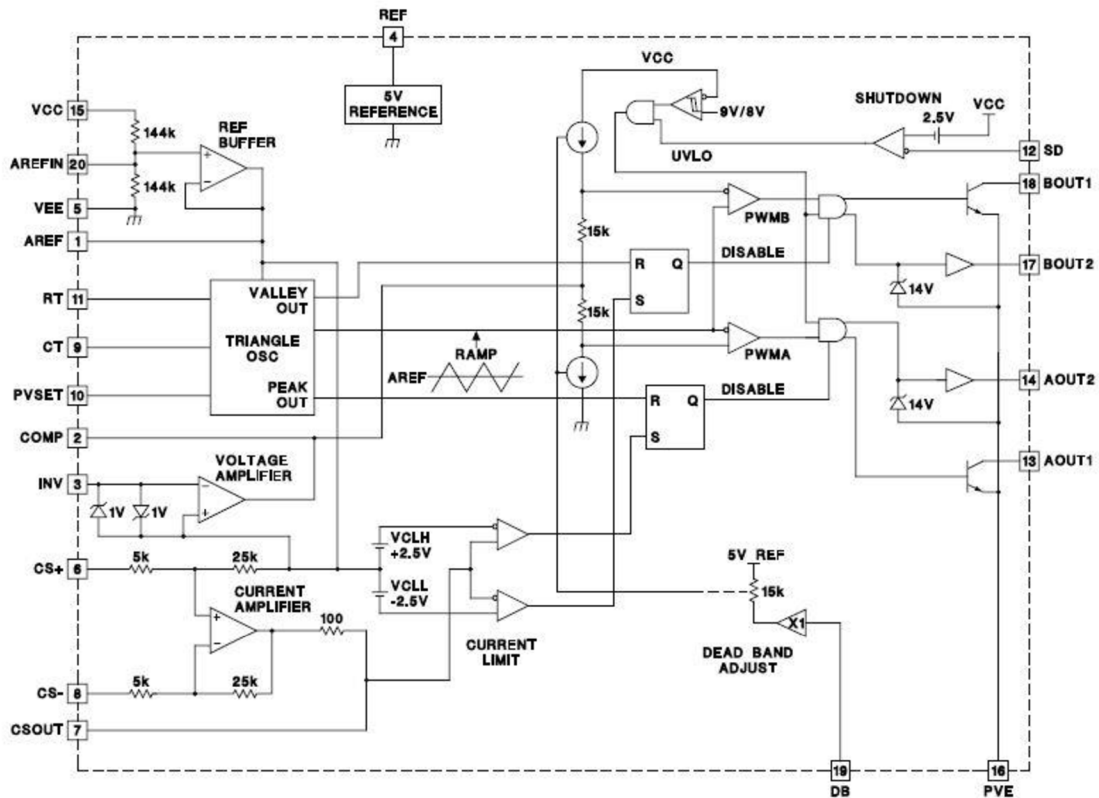


řízení spodních tranzistorů v můstku s proudovou špičkou 500 mA. Všechny obvodové bloky jsou navrženy pro maximální frekvenci 500 kHz.

Přednost toho čipu spočívá v integrování mnoha různých obvodů nutných pro řízení čtyřkvadrantového měniče jako je například programovatelný čas „dead time“, podpětová ochrana, nadproudová ochrana a chybový komparátor umožňující realizaci proudové zpětné vazby. Dále čip umožňuje napájení napětím až 40 V při napájení napětím s oběma polaritami nebo jen s jednou polaritou. [21]

### 5.3.1 Vnitřní struktura UC3638

Na obrázku 5.5 je znázorněna vnitřní struktura obvodu UC3638. Kladné napájecí napětí je přivedeno na pin VCC. Na pin VEE může být připojeno buď záporné napájecí napětí v případě napájení napětím obou polarit, nebo potenciál země v případě napájení napětím jedné polarity.



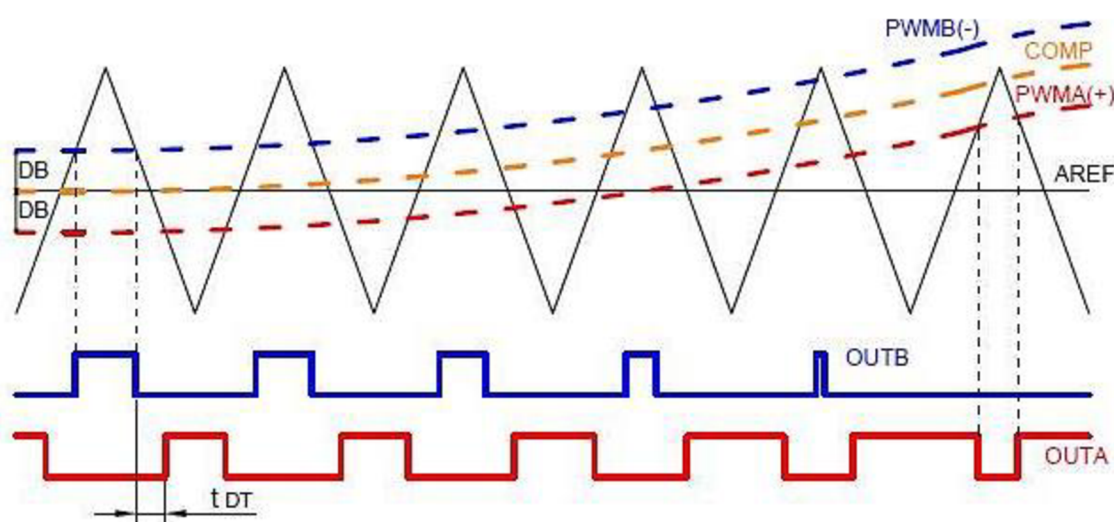
Obrázek 5.5: Vnitřní struktura obvodu UC3638, převzato z [21]

Pro vznik PWM modulace je použit klasický komparátor, na jehož jeden vstup je přiveden nosný vysokofrekvenční trojúhelníkový signál a na jeho druhý vstup je přiveden nízkofrekvenční modulační signál. Tento signál může být ještě zesílen přes napěťový zesilovač, jehož vstupy tvoří piny COMP a INV. Komparátor potom produkuje řídicí signál k řízení tranzistorů obdélníkovým signálem. Frekvence trojúhelníkového signálu se definuje pomocí rezistoru připojeného na pin RT a pomocí kondenzátoru připojeného na pin CT. Výška trojúhelníkového

signálu se potom definuje napětím na pinu PVSET. Napětí na pinu AREF určí napěťový střed trojúhelníkového signálu. Princip změny střídy je znázorněn na obrázku 5.6. Z obrázku plyne, že změnou napětí na napěťovém zesilovači lze regulovat střídu spínání tranzistorů. Napětí DB určuje rozestup mezi řídicími signály PWM<sub>A</sub> a PWM<sub>B</sub>. Ve výsledku tento rozestup způsobí ochranný časový úsek mezi sepnutím jedné větve a rozepnutím druhé větve, tzv. „dead time“  $t_{DT}$ . Velikost rozestupu DB se nastaví přivedením napětí  $U_{DB,set}$  na pin DB. Výstupní signál OUTA a OUTB spíná vždy jednu z úhlopříček.

Obvod UC3638 dále obsahuje komparátor proudového omezení. Proud je snímán dvěma rezistory umístěnými v každé větvi tak, aby dokázali snímat proud při obou směrech otáčení motoru. Použití dvou snímacích rezistorů má význam především při realizaci průběžné proudové zpětné vazby. Signály z obou rezistorů jsou přivedeny na piny CS+ a CS-. Pin CSOUT slouží k realizaci zpětné vazby, která se vytvoří tak, že se signál z CSOUT přenesse externím rezistorem na pin INV. Jestliže zpětná proudová vazba není vyžadována, lze pin CSOUT připojit na potenciál země přes kondenzátor, aby s vestavěným vnitřním rezistorem vytvořil filtrační člen.

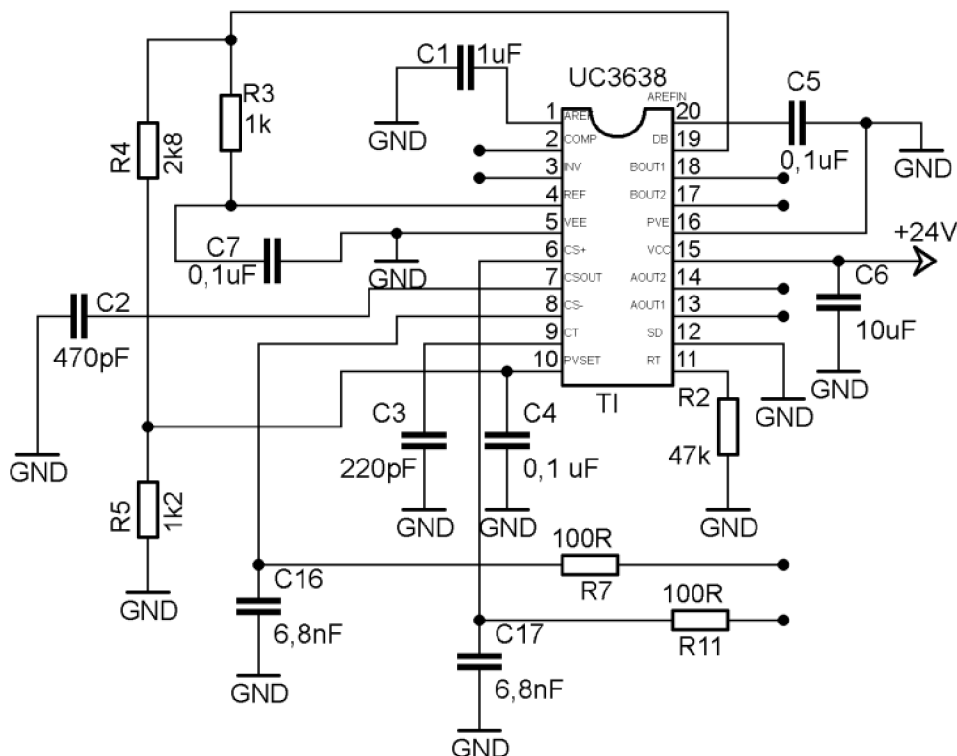
Čip UC3638 je vybaven základní podpěťovou ochranou, která zajistí vypnutí tranzistorů, pokud napětí mezi piny VCC a VEE poklesne pod 9 V. Přivedením napětí na pin SD lze definovat napětí, při kterém se čip aktivuje. Dokud toto napětí nedosáhne určené hodnoty, všechny výstupy řídicí tranzistory jsou deaktivovány. [21]



Obrázek 5.6: Princip regulace střídy a význam napětí  $U_{DB}$ , převzato z [20] a upraveno autorem

### 5.3.2 Popis zapojení řídicího obvodu s integrovaným obvodem UC3638

Zapojení čipu UC3638 vychází z katalogového schématu, jak naznačuje obrázek 5.7. Celé schéma se nachází v příloze 1. Čip je napájen napětím 24 V prostřednictvím pinu VCC. V blízkosti pinu se nachází blokovací keramický kondenzátor C<sub>6</sub> o kapacitě 10 μF. Pin VEE je připojen k potenciálu země. Dle doporučení výrobce jsou piny AREF a AREFIN připojeny k potenciálu země přes kondenzátor C<sub>1</sub> s kapacitou 1 μF (AREF) a kondenzátor C<sub>5</sub> s kapacitou 0,1 μF (AREFIN). [22]



Obrázek 5.7: Zapojení obvodu s integrovaným obvodem UC3638

#### Nastavení spínací frekvence [21]

Spínací frekvence tranzistorů je definována rezistorem R<sub>2</sub> a kondenzátorem C<sub>3</sub>. Výpočet frekvence je dán vztahem:

$$f_{PWM} = \frac{1}{5 \cdot R_2 \cdot C_3} \quad (32)$$

Frekvence spínání tranzistorů je 20 kHz. Tato hodnota je zvolena především s ohledem na minimalizaci přepínacích ztrát tranzistorů. Dle výrobce je vhodné zvolit kondenzátor C<sub>3</sub> jako keramický s nízkou parazitní indukčností o hodnotě 220 pF. Proto je nutné vypočítat odpor rezistoru R<sub>2</sub>, který se určí následovně:

$$R_2 = \frac{1}{5 \cdot f_{PWM} \cdot C_3} \quad (33)$$

Po dosazení:

$$R_2 = \frac{1}{5 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-12}} = 45454,5 \Omega = 45,45 \text{ k}\Omega$$

Z výsledku je patrné, že tato hodnota rezistoru není normalizována. Proto je hodnota odporu rezistoru  $R_2$  zvolena nejbližší možná v řadě a to 47 k $\Omega$ .

Rezistor  $R_2$  také určuje nabíjecí a vybíjecí proud kondenzátoru  $C_3$ . Výrobce doporučuje, aby hodnota nabíjecího a vybíjecího proudu nepřesáhla 1 mA.

### Nastavení amplitudy trojúhelníkového signálu [21]

Dále je nutné navrhnout velikost trojúhelníkového nosného signálu. Napětí špička – špička je zvoleno 6 V a to podle katalogu. Nastavení zvolené výšky trojúhelníkového signálu se provede přivedením napětí na pin PVSET. Vztah mezi napětím na pinu a výškou trojúhelníkového signálu vypadá takto:

$$U_{PVSET} = \frac{U_{p-p}}{5}, \quad (34)$$

kde  $U_{p-p}$  je zvolené napětí špička – špička, tedy 6 V. Číselně pak platí:

$$U_{PVSET} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ V}$$

### Nastavení ochranné doby „deadtime“ [21]

Dále je třeba zvolit napětí  $U_{DB,set}$  na pinu DB, které definuje ochranný čas „deadtime“. Hodnota napětí je zvolena podle katalogu a to  $U_{DB} = 1 \text{ V}$ . Pro výpočet napětí  $U_{DB}$  platí:

$$U_{DB,set} = 5 - U_{DB} \quad (35)$$

Po číselném dosazení:

$$U_{DB,set} = 5 - 1 = 4 \text{ V}$$

Pro výpočet aktuálního ochranného času „deadtime“ je nutné podělit napětí  $U_{DB}$  amplitudou trojúhelníkového signálu a následně vynásobit periodou spínání:

$$t_{DT} = \frac{U_{DB}}{U_{p-p}} \cdot T_{PWM} = \frac{U_{DB}}{U_{p-p}} \cdot \frac{1}{f_{PWM}} \quad (36)$$

Dosazením rovnic (33) a (35) do (36) platí:

$$t_{DT} = \frac{U_{DB}}{5 \cdot U_{PVSET}} \cdot 5 \cdot R_2 \cdot C_3 = \frac{U_{DB} \cdot R_2 \cdot C_3}{U_{PVSET}} \quad (37)$$

Číselně tedy platí:

$$t_{DT} = \frac{1 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-12}}{1,2} = 8,62 \mu\text{s}$$

Výsledný ochranný čas „deadtime“ je nutné porovnat s nejhorším možným případem zapnutí a vypnutí tranzistorů v jedné větvi. Z tabulky 5.2 je patrné, že nejhorší případ nastane při vypínání tranzistoru typu P a zapínání tranzistoru typu N. Nutný čas pro eliminaci zkratu je tedy 0,3  $\mu\text{s}$ . Dále je nutné počítat s mírným zpožděním zapínacího děje a to kvůli přítomnosti odporu na hradle tranzistoru. Proto je ochranný čas „deadtime“ zvolen s rezervou.

### Určení odporu rezistorů $R_3 - R_5$ [21]

Nyní jsou známa všechna potřebná napětí na pinech a tak lze určit hodnoty odporu na děliči napětí  $R_3 - R_5$  napájeném z pinu REF. Pin REF poskytuje stabilní a precizní napětíovou referenci  $U_{ref} = 5$  V. Podle doporučení výrobce je při výpočtu vhodné vyjít z proudu  $I_{source}$  tekoucím přes odporový dělič. Výrobce doporučuje nepřesáhnout hodnotu  $I_{source} = 1$  mA. Součet všech odporů děliče napětí se musí rovnat referenčnímu napětí lomeno proudem tekoucím přes rezistory, proto platí:

$$R_3 + R_4 + R_5 = \frac{U_{ref}}{I_{source}} \quad (38)$$

Součet všech odporů děliče napětí je číselně roven:

$$R_3 + R_4 + R_5 = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3}} = 5000 \Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

Pro nastavení zvoleného ochranného času „deadtime“ je nutné na pin DB přivést rozdíl napětí  $U_{ref}$  a  $U_{DB,set}$  při zachování stejné hodnoty proudu  $I_{source}$ . Pro hodnotu odporu rezistoru  $R_3$  tedy platí:

$$R_3 = \frac{U_{ref} - U_{DB,set}}{I_{source}} \quad (39)$$

Číselně potom platí:

$$R_3 = \frac{5 - 4}{1 \cdot 10^{-3}} = 1000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$$

Nastavení amplitudy trojúhelníkového signálu se provede tak, že na pin PVSET přivede rozdíl napětí  $U_{DB,set}$  a  $U_{PVSET}$ . Při zachování konstantní hodnoty proudu  $I_{source}$  lze pro odpor rezistoru  $R_4$  psát:

$$R_4 = \frac{U_{DB,set} - U_{PVSET}}{I_{source}} \quad (40)$$

Číselně tedy platí:

$$R_4 = \frac{4 - 1,2}{1 \cdot 10^{-3}} = 2800 \Omega = 2,8 \text{ k}\Omega$$

Pro výpočet zbývající hodnoty odporu  $R_5$  lze využít rovnici (38). Platí tedy:

$$R_5 = \frac{U_{ref}}{I_{source}} - R_3 - R_4 \quad (41)$$

Hodnota odporu  $R_5$  tedy činí:

$$R_5 = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3}} - 1000 - 2800 = 1200 \Omega = 1,2 \text{ k}\Omega$$

Aby se zamezilo případným nežádoucím záskmitům, jsou piny REF a PVSET vybaveny filtračními kondenzátory připojenými na potenciál země.

### Nastavení proudového omezení [21]

Čip UC3638 je vybaven blokem pro průběžné snímání proudu motorem, které může být využito k proudové zpětné vazbě anebo také k limitaci proudu procházejícího motorem. V případě této aplikace není proudová zpětná vazba vyžadována a proto je pin CSOUT připojen přes kondenzátor  $C_2$  o kapacitě 470 pF na potenciál země. Tento kondenzátor slouží spolu v kombinaci s vnitřním rezistorem o hodnotě 100  $\Omega$  jako filtr vysokofrekvenčního šumu. Proudové

omezení zle realizovat pomocí bočníku pro každou větev samostatně. Výrobce udává, že při rozdílu napětí  $\Delta U_{CS} = 0,5 \text{ V}$  mezi piny CS+ a CS- začne aktivně působit proudová limitace. Proudovou limitaci tedy lze nastavit hodnotou odporu bočníku a platí:

$$R_s = \frac{\Delta U_{CS}}{I_{mot}}, \quad (42)$$

kde  $I_{mot}$  je požadovaný maximální proud motorem. Vzhledem k požadavkům aplikace je tento proud zvolen  $I_{mot} = 20 \text{ A}$ . Nyní lze číselně vyjádřit hodnotu odporu bočníku:

$$R_s = \frac{0,5}{20} = 0,025 \Omega$$

Dále je také nutné určit výkonové zatížení bočníku při průchodu maximálního proudu motorem. Tento výkon se určí ze známého vztahu:

$$P_{RS} = R_s \cdot I_{mot}^2 \quad (43)$$

Výkon je tedy roven:

$$P_{RS} = 0,025 \cdot 20^2 = 10 \text{ W}$$

Z výpočtů plyne, že hodnota odporu bočníku má dosahovat  $0,025 \Omega$  s výkonovou ztrátou  $10 \text{ W}$ . Takový výkonový rezistor není běžně k dostání, a proto je nezbytné, použít několik rezistorů paralelně. Jako optimální varianta se jeví použití čtyř speciálních snímacích bezindukčních rezistorů SMD každý o odporu  $0,1 \Omega$  se ztrátovým výkonem  $2,5 \text{ W}$ .

Signál z bočníku je filtrován pomocí dolní propusti, aby se odrušil nežádoucí vysokofrekvenční šum při přepínání tranzistorů. Jedná se o klasický lineární RC filtr s mezní frekvencí  $f_{DP} = 200 \text{ kHz}$ . Pro výpočet mezního kmitočtu platí:

$$f_{DP} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{DP} \cdot C_{DP}}, \quad (44)$$

kde  $R_{DP}$  je hodnota odporu rezistoru filtru a  $C_{DP}$  je hodnota kapacity kondenzátoru filtru. Jelikož mezní frekvence je již stanovena, lze také určit hodnotu odporu rezistoru  $R_{DP} = 100 \Omega$ . Potom již z rovnice (44) lze vyjádřit hodnotu kapacity:

$$C_{DP} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{DP} \cdot f_{DP}} \quad (45)$$

Po dosazení platí:

$$C_{DP} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 200 \cdot 10^3} = 7,95 \text{ nF}$$

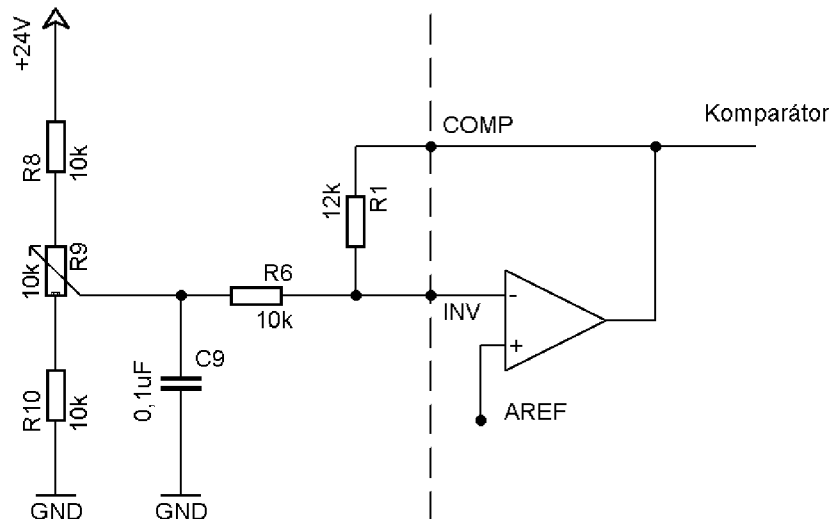
Jelikož tato hodnota kapacity není normalizována, je zvolena nejbližší možná a to  $6,8 \text{ nF}$ . Na obrázku 5.7 jsou rezistory  $R_{DP}$  označeny  $R_7$  a  $R_{11}$  a kondenzátory  $C_{DP}$  jako  $C_{17}$  a  $C_{18}$ .

## Podpěťová ochrana [21]

Čip UC3638 umožňuje realizaci podpěťové ochrany. Jelikož je čip základní podpěťovou ochranou vybaven a zároveň tato ochrana není v této aplikaci použita, je pin SD připojen k potenciálu země.

## Řízení střídny měniče [21]

K řízení střídny spínání tranzistorů využívá komparátor čipu napětí modulované napětěovým zesilovačem. Invertující vstup napětěového zesilovače tvoří pin INV. Výstup napětěového zesilovače je vyveden na pin COMP. Připojením obecné impedance mezi tyto dva piny a obecné impedance před pin INV lze realizovat jakýkoli invertující zesilovač, na jehož neinvertující vstup je přivedeno napětí  $U_{AREF}$ . Změnou napětí na vstupu zesilovače lze měnit střidu spínání tranzistorů. Zapojení zesilovače je na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Princip řízení čipu UC3638

Výrobce doporučuje, aby napětí na pinu INV dosahovalo dolní mezní hodnoty  $U_{VEE} + 2V$  a horní mezní hodnoty  $U_{VCC} - 1V$ . Napětí  $U_{AREF}$  je rovno polovině napájecího napětí, tedy 12 V. Proto je vhodné, aby byl řídicí signál z potenciometru  $R_9$  osciloval okolo hodnoty 12 V a zároveň nedosahoval krajních hodnot napájecího napětí. Toho se dosáhne třemi rezistory zapojenými do série sloužící jakou dělič napětí. Jelikož je znám odpor potenciometru  $R_9 = 10\text{ k}\Omega$ , lze jednoduchou úvahou dojít k závěru, že pokud zbylé dva rezistory  $R_8$  a  $R_{10}$  dosáhnou hodnoty odporu  $10\text{ k}\Omega$ , napájecí napětí se rozdělí na třetiny. Pro první krajní stav potenciometru platí [23]:

$$U_{\check{r}1} = U_{VCC} \cdot \frac{R_8}{R_8 + R_9 + R_{10}} \quad (46)$$

Po dosazení:

$$U_{ř1} = 24 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 8 \text{ V}$$

Pro druhý krajní stav potenciometru lze psát:

$$U_{ř2} = U_{VCC} \cdot \frac{R_8 + R_9}{R_8 + R_9 + R_{10}} \quad (47)$$

Číselně tedy:

$$U_{ř2} = 24 \cdot \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^3}{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 16 \text{ V}$$

Z výsledků je patrné, že řídicí napětí bude v rozsahu od 8 V až po 16 V, respektive  $\Delta U_{ř} = 8 \text{ V}$ . Nyní je nutné, toto řídicí napětí upravit tak, aby dosahovalo amplitudy trojúhelníkového signálu  $U_{p-p} = 6 \text{ V}$ . Dále je třeba si uvědomit, že amplitudu tohoto signálu ještě zvyšuje napětí  $U_{DB}$  a to o 2 V. Z toho vyplývá, že potřebné komparační napětí  $U_{KOMP}$  musí dosahovat hodnoty alespoň 8 V. Napětí na jezdcí potenciometru tohoto rozdílu dosahuje, ale pro jistotu je napětí zesilovači vnuceno zesílení zhruba  $K_p = 1,2$ . Pro napětíový přenos proporcionálního členu platí:

$$K_p = -\frac{R_1}{R_6} \quad (48)$$

Hodnota odporu  $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$  byla zvolena odhadem. Proto nyní lze dopočítat hodnotu odporu rezistoru  $R_1$  při požadovaném napětíovém přenosu  $K_p$ . Pro odpor rezistoru  $R_1$  platí:

$$R_1 = -R_6 \cdot K_p \quad (49)$$

Absolutní hodnota požadovaného odporu rezistoru činí:

$$|R_1| = -10 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = -12 \cdot 10^3 = 12 \text{ k}\Omega$$

### Řízení spodních tranzistorů v můstku [21]

Piny AOUT2 a BOUT2 jsou schopny řídit spodní stranu tranzistorů v můstku, jelikož jsou tyto piny schopné dodávat špičkový proud až 500 mA. Tranzistor je před hradlem vybaven rezistorem, který omezuje strmost du/di. Jelikož není vyžadováno velké omezení, lze zvolit hodnotu rezistoru  $R_{gd} = 22 \Omega$ .

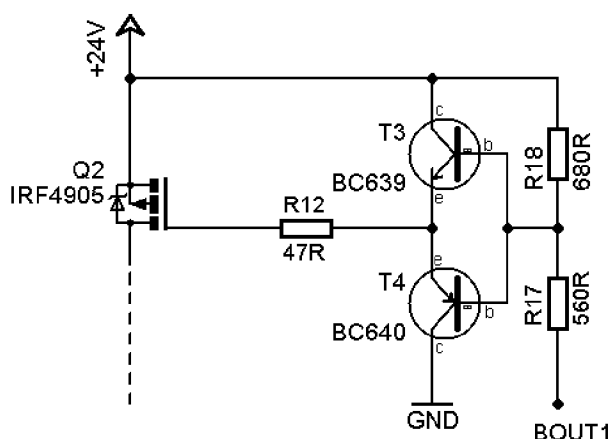
### Budiče horních tranzistorů v můstku

Pro řízení horních tranzistorů v můstku je čip vybaven otevřenými kolektory (piny AOUT1 a BOUT1), které jsou navrženy pro řízení P - kanálových tranzistorů MOS-FET. Tyto otevřené kolektory umožní proud až 50 mA při maximálním napětí 60 V. Jelikož napětí měniče je nízké, lze realizovat jednoduchý budič horních tranzistorů typu MOS-FET podle katalogového zapojení. [21]

Základem tohoto budiče je napětíový dělič a emitorový sledovač. Budič je řízen otevřeným kolektorem čipu, jehož druhý konec je spojen s potenciálem země. Pokud dojde k sepnutí otevřeného kolektoru, na bázích bipolárních tranzistorů  $T_3$



a  $T_4$  se objeví napětí definované děličem. Toto napětí je ještě dále proudově zesíleno pomocí emitorového sledovače, který se skládá z bipolárních tranzistorů typu PNP a NPN. Takto posílený signál je dále přes rezistor  $R_{12}$  dopraven do hradla tranzistoru MOS-FET typu P ( $Q_2$ ). Toto napětí působí jako záporné vůči napájecímu napětí, čímž dojde k otevření výkonového tranzistoru  $Q_2$ . Naopak, když není otevřený kolektor sepnut, je na bázích bipolárních tranzistorů  $T_3$  a  $T_4$  napětí  $+24\text{ V}$ , které je přivedeno přes rezistor  $R_{18}$ . Toto napětí je opět proudově posíleno a přivedeno na hradlo výkonového tranzistoru napájecí napětí  $24\text{ V}$ . Tímto dojde k uzavření výkonového tranzistoru  $Q_2$ . [24]



**Obrázek 5.9: Budič horního výkonového tranzistoru**

Dělič napětí definuje spínací napětí výkonového tranzistoru a zároveň omezuje proud tekoucí otevřeným kolektorem. Hodnoty rezistorů byly odhadnuty následovně:  $R_{18} = 680\ \Omega$  a  $R_{17} = 560\ \Omega$ . Pro určení napětí  $U_{hradlo}$  na děliči, které bude spínat tranzistor, lze využít známý vztah:

$$U_{hradlo} = U_{VCC} \cdot \frac{R_{18}}{R_{17} + R_{18}} \quad (50)$$

Kdy napětí  $U_{VCC}$  je napájecí napětí o hodnotě  $24\text{ V}$ . Číselně tedy platí:

$$U_{hradlo} = 24 \cdot \frac{680}{560 + 680} = 13,16\text{ V}$$

Proud, který teče otevřeným kolektorem čipu  $I_{OC}$ , je potom dán podílem napájecího napětí a sériové kombinace rezistorů  $R_{17}$  a  $R_{18}$ . Platí tedy:

$$I_{OC} = \frac{U_{VCC}}{R_{17} + R_{18}} \quad (51)$$

Po vyčíslení:

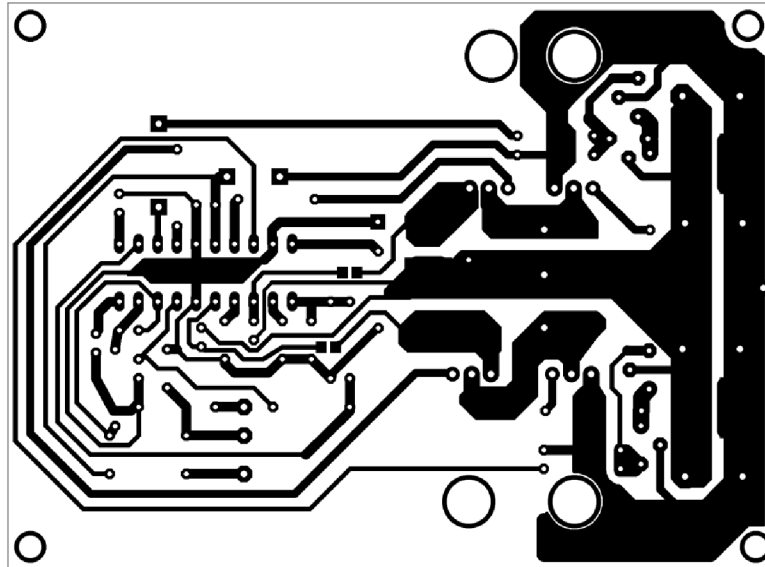
$$I_{OC} = \frac{24}{680 + 560} = 19,35\text{ mA}$$

Hodnota proudu  $I_{OC}$  nepřesahuje  $50\text{ mA}$ , což je žádoucí.

Emitorový sledovač tvoří tranzistor typu NPN  $T_3$  a tranzistor typu PNP  $T_4$ . Tranzistory byly zvoleny tak, aby byly schopné dodávat výstupní proud, až  $1\text{ A}$ . Těmto požadavkům dopovídají tranzistory BC639 (NPN) a BC640 (PNP).

## 5.4 Realizace měniče

Schéma a návrh desky plošného spoje (DPS) byl realizován prostřednictvím programu Eagle. Jedná se o volně dostupnou verzi pro komerční využití. Oproti placené verzi nemá program tolik funkcí, ovšem pro návrh DPS pro tuto aplikaci volně šiřitelná verze postačuje. Celé schéma zapojení je k vidění v příloze 1.



Obrázek 5.10: Návrh DPS

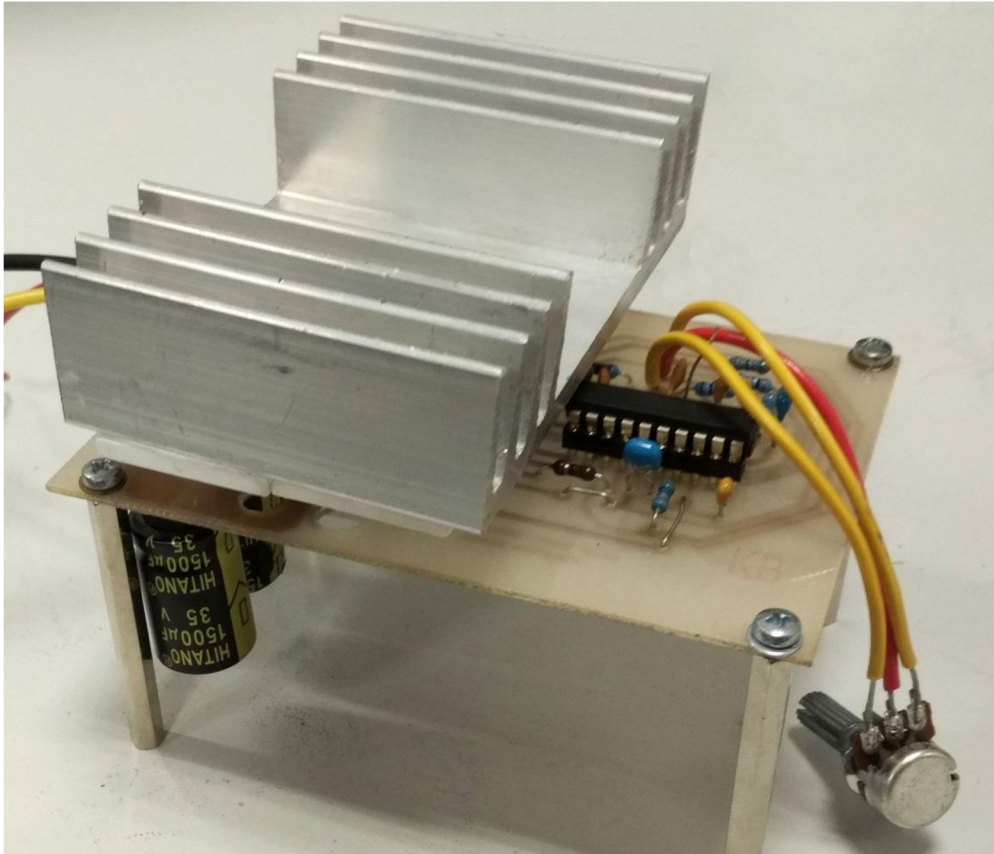
Jelikož se jedná o jednoduché zapojení s integrovaným obvodem a několika externími součástkami, bylo přistoupeno k realizaci jednovrstvé DSP. Proto se v obvodu nachází několik drátových propojek. Většina součástek je v klasickém drátovém provedení. Integrovaný obvod UC3638 není na desce osazen přímo, nýbrž je do obvodu zapojován skrz patiči. Snímací rezistory proudu (ve schématu označeno  $R_{SENSE1}$  a  $R_{SENSE2}$ ) a filtračních rezistory  $R_7$  a  $R_{11}$  jsou v provedení SMD a to kvůli eliminaci parazitní indukčnosti, která může způsobit nepřesnost při snímání proudu. Dále je v provedení SMD osm keramických kondenzátorů  $C_K$  v meziobvodu a to kvůli potlačení parazitní indukčnosti výkonových elektrolytických kondenzátorů  $C_E$ .

Rozmístění součástek respektuje požadavek oddělit silový obvod od řídicího. Silový obvod bude pracovat s nízkým napětím 24 V, ovšem cesty je nutné navrhnut tak, aby snesly proud až 20 A. Proto bylo přistoupeno ještě k pocínování silových cest obvodu. Tímto krokem se zvýší průřez vodivých cest, zamezí se jejich přehřívání a také klesne jejich indukčnost.

Pozornost byla věnována rozmístění budičů horních tranzistorů. Jelikož se jedná o řídicí obvod, je umístěn co nejbližší k výkonovým tranzistorům. Tímto opatřením se omezí vliv parazitních indukčností, které se mohou vytvořit v dlouhé

cestě. Pro omezení vlivu parazitní indukčnosti signálu z bočníku, je k těmto cestičkám vedena co nejbližší cestička spojená s potenciálem země.

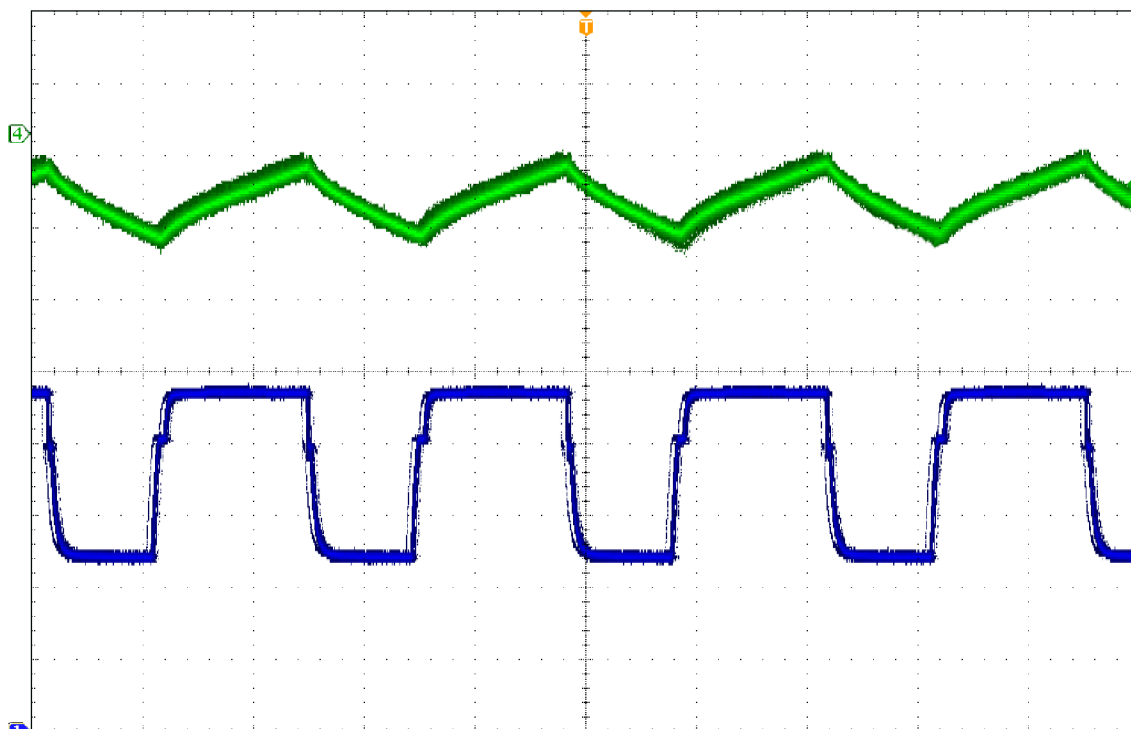
Výkonové tranzistory MOS-FET jsou umístěny tak, aby je bylo možné ohnout o 90°. Na všechny tranzistory se pak připevnil společný chladič, který je umístěn ze strany součástek. Pohled na zhotovený měnič je na obrázku 5.11.



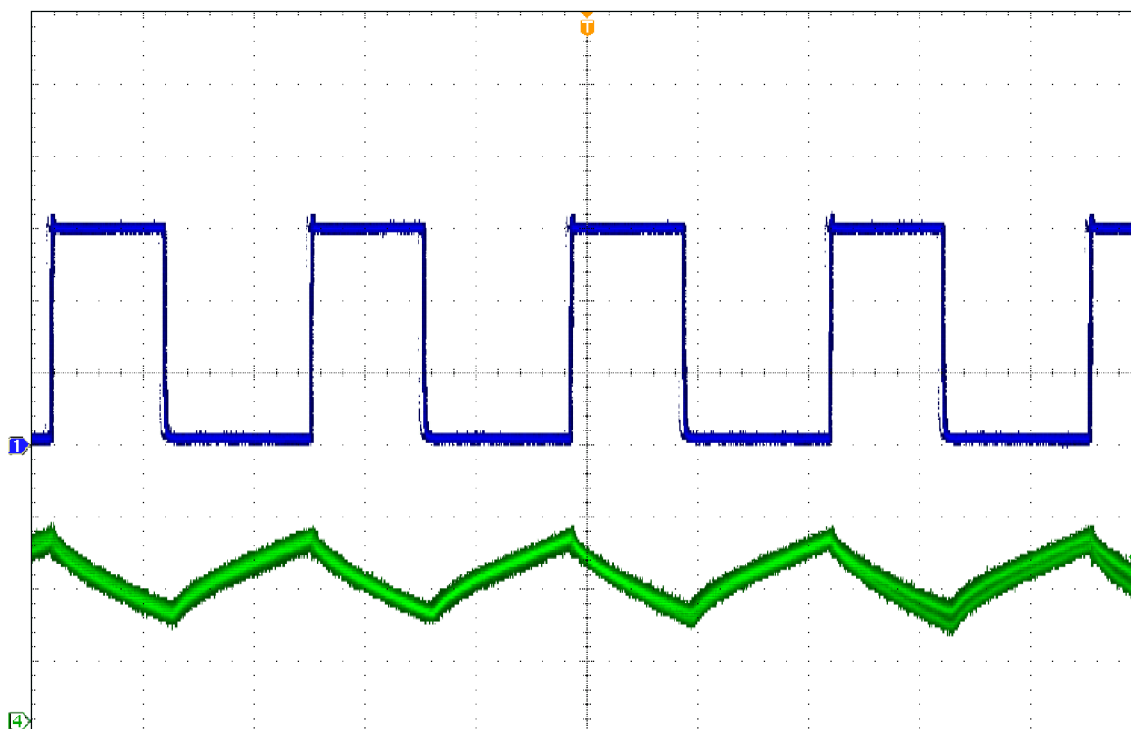
Obrázek 5.11: Prototyp zhotoveného měniče - pohled ze strany součástek

## 5.5 Měření na zhotoveném měniči

Na zhotoveném měniči proběhlo několik zkušebních měření. V první části měření byla odzkoušena podpětová ochrana. Podle výrobce by měla zapůsobit při napájecím napětí menším než 10 V, což se potvrdilo. Dále byl nasnímán průběh proudu při střídě menší než 1. Zobrazeny jsou také řídicí signály horních i dolních tranzistorů.



Obrázek 5.12: Průběh řídicího napětí horních tranzistorů  $U_{GH}$  (5V/dílek) a proudu  $I_Z$  (500mA/dílek) při střídě menší než  $s = 0,5$  a frekvenci  $f_{PWM} = 20$  kHz



Obrázek 5.13: Průběh řídicího napětí dolních tranzistorů  $U_{GD}$  (5V/dílek) a proudu  $I_Z$  (500mA/dílek) při střídě menší než  $s = 0,5$  a frekvenci  $f_{PWM} = 20$  kHz

## 5.6 Zhodnocení dosažených výsledků

Měřením byla ověřena spínací frekvence, která činí zhruba 20 kHz. Z průběhu proudu  $I_z$  je patrné, že maximální zvlnění bylo naměřeno zhruba 600 mA. Tato hodnota zvlnění proudu odpovídá teoretickým výpočtům.

Podle výrobce je čip schopen spínat dolní tranzistory napětím 14 V. Z průběhu spínacího napětí dolních tranzistorů  $U_{GD}$  je patrné, že se signál tvarem blíží ideálnímu průběhu a dosahuje maximální hodnoty napětí zhruba 14 V.

Spínací napětí horních tranzistorů dle teoretických výpočtů činí 13,6 V, což se potvrdilo. Spínací napětí horních tranzistorů  $U_{GH}$  se tvarem neblíží ideálnímu průběhu. Nástupné a sestupné hrany nejsou pravoúhlé jako například u průběhu spínacího napětí dolních tranzistorů  $U_{GD}$ . To má za následek delší zapínací a vypínací děj výkonového tranzistoru, což způsobí zvýšení přepínacích ztrát. Na vině je zřejmě velká hodnota odporu rezistorů v napět'ovém děliči budiče. Ke zkvalitnění spínání může také přispět snížení hodnoty odporu rezistoru hradla výkonového tranzistoru. Dále může být na vině použití součástek v klasickém drátovém provedení, protože se může projevit jejich parazitní indukčnost. Základní během zapínacího a vypínacího děje způsobuje tzv. Millerova kapacita (kapacita mezi Gate – Drain). Ta se nejvíce projeví při vypínacím ději, kdy se musí zároveň vybit kapacita Gate – Source a zároveň i kapacita Gate - Drain. Z toho plyne, že vypínací děj je mírně zpožděn.[25]

Určité zlepšení by mohla přinést nová konfigurace DPS. Řešení se nabízí v podobě zhotovení dvouvrstvé DPS. Jedna vrstva by sloužila k rozvádění řídicích obvodů a druhá k rozvedení obvodů silových. Těmito kroky by se mohly cesty řídicího obvodu výrazně zkrátit, čímž by se dosáhlo omezení vlivu parazitní indukčnosti smyček. Další zlepšení parametrů DPS by mohla přinést náhrada klasických drátových součástek za součástky typu SMD. Jejich výhoda spočívá v absenci parazitních indukčností. Další výhodou by bylo i zmenšení celkové plochy DPS.

Z aktuální konfigurace DPS pramení další nevýhoda. Jelikož čip UC3638 není na desce osazen přímo, ale je připojen k obvodu přes patiči, svou výškou nedovoluje zvětšení plochy chladiče. V nové konfiguraci by bylo výhodné, aby tranzistory byly osazeny ze strany mědi DPS. Chladicí plocha chladiče se může v tomto uspořádání podle potřeby zvětšit přes celou DPS.

## 6 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo specifikovat parametry pohonu a navrhnout nejvýhodnější řešení. Podle těchto specifikací pak vybrat konkrétní motor, akumulátor a vhodný přenos momentu na poháněné kolo.

Nejprve byl vypočten potřebný výkon hnacího motoru při stanovené rychlosti a hmotnosti vozíku i s nákladem. Následoval výpočet potřebného momentu, který zajistí převodové zařízení. V další části vznikla literární rešerše prvků pohonu. Jednalo se o specifikaci výhod a nevýhod dostupných elektromotorů, akumulátorů a zařízení pro přenos momentu. Z těchto poznatků byly vybrány konkrétní prvky pohonu. Především se jedná o stejnosměrný motor typu MY1016Z s permanentními magnety, který je velmi dobře dostupný na trhu. Motor dosahuje nominálního výkonu 250 W a je uzpůsoben pro použití v pohonu. Právě proto má na výstupním hřídeli ozubené kolečko, které usnadňuje následnou realizaci převodovky. Vhodným zdrojem energie se jeví akumulátor Li-ion typu 7S3P 18650 s jmenovitým napětím 24 V o kapacitě 6 Ah. Přenos momentu bude realizován pomocí ozubených kol spojených řetězem. S ohledem na tuto skutečnost, byly dále vypočítány parametry ozubených kol pro konstrukci převodovky.

Náplň druhé části práce spočívá v návrhu a realizaci tranzistorového měniče pro stejnosměrný motor. Jako nejvýhodnější řešení se jeví realizace čtyřkvadrantového měniče, který umí pracovat s oběma polaritami napětí i s oběma směry proudů. Pro řízení tohoto měniče byl zvolen integrovaný obvod UC3638 od firmy Texas Instrument. Jedná se o jednorúčelový čip pro řízení čtyřkvadrantového měniče s externími tranzistory. Hlavní přednosti tohoto čipu spočívají v nastavitelné frekvenci spínání tranzistorů, rychlém komparátoru PWM, nastavitelnému proudovému omezení a určení ochranné doby „dead time“. Nejprve byl navrhnout silový obvod a následně řídicí obvod s čipem UC3638. Poté byl celý měnič realizován a na prototypu byla ověřena jeho funkčnost. Dále proběhla série měření na zhotoveném měniči. V poslední části byly shrnuty všechny klady a zápory daného prototypu a byly také navrženy případné vylepšení pro tento obvod.

# Literatura

- [1] Kolečka. *Kolečkárna Tlumačov* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.koleckarna.cz/>
- [2] Rozklad sil. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/700-rozklad-sil>
- [3] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*. Brno.
- [4] KOLEKTIV. *Elektrické stroje*. Brno.
- [5] KREJČÍ, O. *Řídicí jednotka pro BLDC motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Procházka, Ph.D..
- [6] MARCONI. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]., 61 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: [http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni\\_clanky/akumulatory.pdf](http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf)
- [7] HAMMERBAUER, Jiří. Olověné akumulátory. In: *Canov.jergym* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [8] PLEŠTIL, Oldřich. Víte co je AGM? In: *E-AUTO* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.e-auto.cz/ostatni/vite-co-je-agm.htm>
- [9] Differences between AGM, GEL and FLOODED batteries. *BD Chargers* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://bdchargers.com/index.php>
- [10] REDAKCE. Li-ion baterie: principy, provoz, rady. *EXTRAHARDWARE.cz* [online]., 4 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1cast>
- [11] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. *TZB info* [online]., 1 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [12] NiCd akumulátory. *Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=38>
- [13] NiMH akumulátory. *Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory>
- [14] *Battery university* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>
- [15] *MY1016Z2-250W* [online]. In: . s. 2 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://ebikethaikit.com/uploads/443/files/MY1016Z250W.pdf>
- [16] *MY1016Z2. ROBU.IN* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <https://robu.in/product/my1016-250wz2-motor-controller-twist-throttle-diy-electric-bicycle-kit/>
- [17] 24V 6Ah 7S3P 18650 Battery Lithium. *AliExpress* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: [https://www.aliexpress.com/store/product/24V-6Ah-7S3P-18650-Battery-Lithium-Battery-29-4-V-Electric-Bicycle-Moped-Electric-Lithium-ion/1961314\\_32547989047.html](https://www.aliexpress.com/store/product/24V-6Ah-7S3P-18650-Battery-Lithium-Battery-29-4-V-Electric-Bicycle-Moped-Electric-Lithium-ion/1961314_32547989047.html)
- [18] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. : il. ISBN 978-80-214-4003-6.

- [19] IRF4905. Alldatasheet [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68156/IRF/IRF4905.html>Datsheet IRFZ44
- [20] IRFZ44. Alldatasheet [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68620/IRF/IRFZ44.html>
- [21] UC3638. *Texas Instrument* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3638.pdf>
- [22] Closed-Loop Temperature Regulation Using the UC3638 H-Bridge Motor Controller and a Thermoelectric Cooler. *Texas Instrument* [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva202a/slva202a.pdf>
- [23] VOREL, Pavel a Petr PROCHÁZKA. *Řídicí členy v elektrických pohonech*. Brno, 2009.
- [24] VOREL, Pavel a Miroslav PATOČKA. *Průmyslová elektronika*. Brno, 2007.
- [25] ŠTĚPÁNEK, Jan. Stavba pulzního měniče s MOSFET tranzistory [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/5054/1/Stepanek\\_Jan\\_DP.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/5054/1/Stepanek_Jan_DP.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Streit Luboš



# Seznam symbolů, veličin a zkratek

| Symbol            | Popis  | Jednotka            |
|-------------------|--|---------------------|
| $\alpha$          | úhel nakloněné roviny  | [°]                 |
| $C_{DP}$          | kapacita kondenzátoru filtrační dolní propusti                           | [F]                 |
| $\Delta I_{MAX}$  | zvlnění proudu, hodnota špička - špička                                  | [A]                 |
| $\Delta P_{celk}$ | součet přepínacích ztrát a ztrát vedením tranzistoru                     | [W]                 |
| $\Delta P_{přep}$ | přepínací ztráty tranzistoru   | [W]                 |
| $\Delta P_{tot}$  | součet celkových ztrát tranzistoru typu P a typu N                       | [W]                 |
| $\Delta P_{ved}$  | ztráty vedením tranzistoru   | [W]                 |
| $\Delta T$        | povolené oteplení tranzistoru  | [°C]                |
| $\Delta U_{CS}$   | rozdílové napětí mezi piny CS+ a CS- čipu UC3638                         | [V]                 |
| $\Delta U_{ř}$    | rozdíl napětí mezi krajními stavy potenciometru                          | [V]                 |
| $d_k$             | průměr pastorku poháněného kola  | [m]                 |
| $d_m$             | průměr pastorku motoru   | [m]                 |
| DPS               | deska plošného spoje   | [-]                 |
| F                 | síla   | [N]                 |
| $f_{DP}$          | mezní frekvence filtrační dolní propusti                                 | [Hz]                |
| $F_G$             | normálová síla   | [N]                 |
| $F_{Gx}$          | síla působící v ose x  | [N]                 |
| $F_{Gy}$          | síla působící v ose y  | [N]                 |
| $f_{PWM}$         | spínací frekvence  | [Hz]                |
| $F_t$             | tažná síla   | [N]                 |
| g                 | tíhové zrychlení   | [ms <sup>-2</sup> ] |
| i                 | převodový poměr  | [-]                 |
| $i_c$             | okamžitá hodnota proudu kondenzátoru                                     | [A]                 |
| $I_{C,ef}$        | efektivní hodnota kolektorového proudu tranzistoru                       | [A]                 |
| $I_{Cmax}$        | špičkový, trvale opakovatelný kolektorový proud                          | [A]                 |
| $I_{DS}$          | kolektorový proud tranzistoru  | [A]                 |
| $I_{Kon,ef}$      | efektivní hodnota proudu výkonového kondenzátoru                         | [A]                 |
| $I_{MAX}$         | maximální hodnota odebíraného proudu (odpovídá $I_z$ )                   | [A]                 |
| $I_{mot}$         | maximální proud procházející motorem (odpovídá $I_z$ )                   | [A]                 |
| $I_{OC}$          | proud tekoucí otevřeným kolektorem                                       | [A]                 |
| $I_{source}$      | proud tekoucí rezistory R <sub>3</sub> , R <sub>4</sub> a R <sub>5</sub> | [A]                 |
| $I_z$             | proud v meziobvodu   | [A]                 |
| $K_p$             | napěťový přenos proporcionálního členu                                   | [-]                 |
| L                 | indukčnost vinutí cívky  | [H]                 |
| m                 | hmotnost   | [kg]                |
| M                 | točivý moment  | [Nm]                |

|                 |   |                      |
|-----------------|---|----------------------|
| $M_k$           | točivý moment poháněného kola                           | [Nm]                 |
| $M_m$           | točivý moment motoru                                    | [Nm]                 |
| MOS-FET         | Metal Oxide Semiconductor FET                           | [-]                  |
| $n$             | otáčky  | [min <sup>-1</sup> ] |
| $n_{max}$       | maximální otáčky  | [min <sup>-1</sup> ] |
| $n_n$           | jmenovité otáčky  | [min <sup>-1</sup> ] |
| $P$             | výkon   | [W]                  |
| $P_{R_s}$       | výkonová ztráta na rezistoru $R_s$                      | [W]                  |
| PWM             | pulsní šířková modulace                                 | [-]                  |
| $r$             | poloměr kola  | [m]                  |
| $R_{DP}$        | odpor rezistoru filtrační dolní propusti                | [Ω]                  |
| $R_{DS}$        | odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu               | [Ω]                  |
| $R_s$           | odpor snímacího rezistoru proudu                        | [Ω]                  |
| $R_{\theta H}$  | tepelný odpor chladiče                                  | [°C/W]               |
| $R_{\theta ch}$ | tepelný odpor pouzdro - chladič                         | [°C/W]               |
| $R_{\theta jc}$ | tepelný odpor čip – pouzdro                             | [°C/W]               |
| $s$             | dráha   | [m]                  |
| $s$             | střída  | [-]                  |
| SMD             | typ součástek pro povrchovou montáž                     | [-]                  |
| $t$             | čas   | [s]                  |
| $t_{DT}$        | ochranný čas „dead time“                                | [s]                  |
| $t_{vyp}$       | doba vypnutí tranzistoru                                | [s]                  |
| $t_{zap}$       | doba zapnutí tranzistoru                                | [s]                  |
| $T$             | perioda spínání   | [s]                  |
| $U_{AB}$        | napětí mezi větvemi A a B tranzistorového měniče        | [V]                  |
| $U_{AREF}$      | polovina napájecího napětí $U_{VCC}$ čipu UC3638        | [V]                  |
| $U_d$           | napětí stejnosměrného meziobvodu                        | [V]                  |
| $U_{DB}$        | napětí určující rozestup mezi úrovní COMP a PWMA        | [V]                  |
| $U_{DB,set}$    | napětí na pinu DB čipu UC3638                           | [V]                  |
| $U_{DS}$        | závěrné napětí tranzistoru                              | [V]                  |
| $U_{GD}$        | velikost spínacího napětí dolních tranzistorů           | [V]                  |
| $U_{GH}$        | velikost spínacího napětí horních tranzistorů           | [V]                  |
| $U_{hradlo}$    | spínací napětí horních tranzistorů                      | [V]                  |
| $U_{KOMP}$      | napětí, při němž dochází ke komparaci                   | [V]                  |
| $U_{p-p}$       | velikost trojúhelníkového signálu, napětí špička-špička | [V]                  |
| $U_{PVSET}$     | napětí na pinu PVSET čipu UC3638                        | [V]                  |
| $U_{ref}$       | napěťová reference čipu UC3638 (5 V)                    | [V]                  |
| $U_{ř1}$        | napětí při prvním krajním stavu potenciometru           | [V]                  |
| $U_{ř2}$        | napětí při druhém krajním stavu potenciometru           | [V]                  |

|            |                                     |                       |
|------------|-------------------------------------|-----------------------|
| $U_{VCC}$  | kladné napájecí napětí čipu UC3638  | [V]                   |
| $U_{VEE}$  | záporné napájecí napětí čipu UC3638 | [V]                   |
| $U_z$      | střední hodnota napětí na motoru    | [V]                   |
| $U_{z,ef}$ | efektivní hodnota napětí na motoru  | [V]                   |
| $v$        | rychlost                            | [ms <sup>-1</sup> ]   |
| $v_{km/h}$ | rychlost v kmh <sup>-1</sup>        | [kmh <sup>-1</sup> ]  |
| $v_{m/s}$  | rychlost v ms <sup>-1</sup>         | [ms <sup>-1</sup> ]   |
| $W$        | práce                               | [J]                   |
| $\omega_k$ | úhlová rychlost poháněného kola     | [rads <sup>-1</sup> ] |
| $\omega_m$ | úhlová rychlost motoru              | [rads <sup>-1</sup> ] |

# Seznam příloh

Příloha 1: Celkové schéma zapojení čtyřkvadrantového měniče s integrovaným obvodem UC3638

