

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

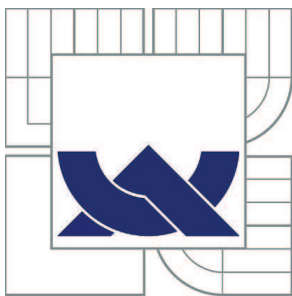
NÁVRH POHONU ELEKTRICKÉ TŘÍKOLKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

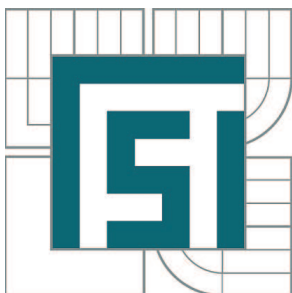
Bc. PETR FILIPEC

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH POHONU ELEKTRICKÉ TŘÍKOLKY

DESIGN OF DRIVE FOR ELECTRIC POWERED TRICYCLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR FILIPEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR PROCHÁZKA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Filipec

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

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

Návrh pohonu elektrické tříkolky

v anglickém jazyce:

Design of drive for electric powered tricycle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o řešení problematiky pohonu elektrické tříkolky. Cílem je nalézt nenákladné řešení, které však uspokojí veškeré požadavky uživatele. Úkolem studenta bude nalézt požadovanou momentově-otáčkovou (resp. výkonově-otáčkovou) charakteristiku pohonu. Na základě této charakteristiky a požadavků uživatele porovnat použitelné elektrické stroje pro trakční pohon a vybrat ten nejvhodnější. S tímto motorem pak navrhnout vhodnou koncepci celého pohonu. Součástí práce bude také srovnání všech pro tuto aplikaci v úvahu připadajících akumulátorů energie a vytipování nejvhodnější technologie.

Cíle diplomové práce:

1. Vytvořte vhodnou momentově-otáčkovou resp. výkonově-otáčkovou charakteristiku.
2. Vyberte vhodný motor s uvážením všech aspektů.
3. Navrhněte koncepci pohonu.
4. Nalezněte vhodnou technologii akumulátoru el. energie pro tuto aplikaci.

Seznam odborné literatury:

1. PATOČKA, M. Vybrané statě z výkonové elektroniky. Svazek I, Tepelné jevy, činný výkon. Brno : Zdeněk Novotný, 2004. 61 s. ISBN 80-214-2742-6 (brož.)
2. PATOČKA, M. Vybrané statě z výkonové elektroniky. Svazek II, Měniče bez impulsního transformátoru. Brno : Zdeněk Novotný, 2004. 175 s. ISBN 80-214-2743-4 (brož.)
3. BALÁTĚ, J. Automatické řízení. Nakladatelství BEN – technická literatura. Praha 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Procházka

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 16.12.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Bibliografická citace

FILIPEC, P. *Návrh pohonu elektrické tříkolky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury, internetových zdrojů a pod vedením vedoucího DP.

V Brně dne.....

Podpis autora.....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce panu Ing. Petru Procházkovi, Ph.D. za cenné podněty a inspirující rady, které mi v souvislosti s diplomovou prací poskytl. Děkuji také svým rodičům za jejich podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhy pohonu pro dva typy elektrických tříkolek (typ do terénu a interiéru). Návrhy zahrnují celkovou koncepci pohonu. Na základě studie elektrických strojů a výpočtů byly vybrány nejvhodnější elektromotory. Práce pokračuje navržením akumulátorů. V poslední části práce se zabýváme návrhem výkonového obvodu a celkovými finančními náklady.

Abstract

This work deals with designs of drive for two types electric powered tricycles (type for outdoor and indoor). Designs comprise general conception of drive. We selected optimal electric motors in terms of research electric engines and calculations. Next, we proposed batteries. The last part describes design power circuit and general financial expenses.

Seznam použitých symbolů a veličin

β	sklon stoupání [°]
β_{p1}	průměrný sklon stoupání v terénu [°]
β_{p2}	průměrný sklon stoupání v interiéru [°]
η	účinnost motoru [%]
η_1	účinnost navrženého DC motoru (Atas P2XR208) [%]
η_2	účinnost navrženého DC motoru (Valeo 404 380) [%]
η_m	účinnost měniče [%]
ξ	součinitel valivého tření [<i>m</i>]
ρ	hustota prostředí [<i>kg/m³</i>]
ω	úhlová rychlost hřídele motoru [<i>rad/s</i>]
ω_3	úhlová rychlost kola [<i>rad/s</i>]
ω_4	úhlová rychlost hřídele motoru [<i>rad/s</i>]
a	zrychlení elektrické tříkolky [<i>m/s²</i>]
C	kondenzátor měniče STEP-UP [<i>F</i>]
C_a	kapacita akumulátoru [<i>Ah</i>]
C_{a1}	kapacita akumulátoru potřebná pro plynulou jízdu po rovině [<i>Ah</i>]
C_{a2}	kapacita akumulátoru potřebná pro plynulou jízdu do kopce [<i>Ah</i>]
C_K	kapacita kondenzátoru [<i>Ah</i>]
$\cos\varphi$	účinník [-]
C_s	součinitel odporu (použili jsme stejný jako u jízdního kola) [-]
d	dojezd elektrické tříkolky [<i>km</i>]
D_0	dioda měniče STEP-UP
e	převodový poměr řetězového převodu pro tříkolku do interiéru
E_a	energie akumulátoru [<i>J</i>]
f	přepínací kmitočet [<i>kHz</i>]
f_1	původní kmitočet napájecího napětí motoru [<i>Hz</i>]
f_1'	nový kmitočet napájecího napětí motoru [<i>Hz</i>]
f_2	kmitočet indukovaného napětí rotorového vinutí [<i>Hz</i>]
F_G	tíhová síla [<i>N</i>]
F_{max}	max. tažná síla (potřebná pro rozjezd vozidla do kopce o sklonu stoupání β)

F_N	normálová síla [N]
F_{red}	redukce silových parametrů [N]
F_t	valivý odpor kol [N]
F_T	tíhová síla, která působí na elektrickou tříkolku v ose x [N]
F_v	odpor prostředí [N]
g	gravitační zrychlení [m/s^2]
i_Z	zvlněný proud vycházející z měniče [A]
I_0	proud při chodu naprázdno [A]
I_3	moment setrvačnosti kola [$kg \cdot m^2$]
I_4	moment setrvačnosti motoru [$kg \cdot m^2$]
I_a	proud protékající akumulátorem [A]
I_{Cef}	efektivní hodnota proudu protékajícího tranzistorem [A]
I_{Cmax}	špičková hodnota proudu protékajícího tranzistorem [A]
$I_{Cstř}$	střední hodnota proudu protékajícího tranzistorem [A]
I_D	maximální velikost proudu, který je tranzistor schopen spínat [A]
I_{fef}	efektivní hodnota fázového proudu před převinutím motoru [A]
I_{fef}'	efektivní hodnota fázového proudu po převinutí motoru [A]
I_j	jmenovitý proud motoru [A]
I_K	maximální přípustný proud, který může protékat jedním kondenzátorem [A]
I_{Kef}	efektivní proud tekoucí kondenzátory [A]
I_{max}	maximální proud tekoucí výkonovým obvodem
I_v	maximální vybíjecí proud akumulátoru
I_z	záběrný proud motoru [A]
I_Z	vstupní proud do motoru [A]
k	koeficient [-]
L	tlumivka měniče STEP-UP
m_1	hmotnost elektrické tříkolky [kg]
m_2	hmotnost uživatele [kg]
m_3	hmotnost kola [kg]
m_4	hmotnost motoru [kg]
m_{red}	redukce hmotnostních parametrů [kg]
m_t	hmotnost elektrické tříkolky bez motoru [kg]
M_j	jmenovitý moment motoru [$N \cdot m$]
M_k	kroutící moment kola [$N \cdot m$]

M_{max}	maximální moment DC motoru [$N\cdot m$]
M_{min}	moment při kterém je dosaženo maximálních otáček n_{max} [$N\cdot m$]
M_{ns}	moment při kterém je motor v nepřetíženém stavu [$N\cdot m$]
M_z	záběrný moment motoru [$N\cdot m$]
M_{zv}	moment zvratu [$N\cdot m$]
n	otáčky kol [min^{-1}]
n_0	otáčky motoru při chodu naprázdno [min^{-1}]
n_1	otáčky magnetického pole statoru [min^{-1}]
n_j	jmenovité otáčky motoru [min^{-1}]
n_{max}	maximální otáčky hřídele motoru [min^{-1}]
n_o	maximální otáčky osy hnaných kol [min^{-1}]
N_{clk1}	celkové náklady pro el. tříkolku do terénu [kč]
N_{clk2}	celkové náklady pro el. tříkolku do interiéru [kč]
o	obvod kola [m]
p	počet pólových dvojic [-]
P_1	průměrný příkon motoru [W]
P_2	průměrný výkon motoru [W]
P_a	výkon akumulátoru [W]
$P_{clk,p}$	celkové přepínací ztráty navrhovaného měniče [W]
$P_{clk,v}$	celkové ztráty vedením proudu tranzistory [W]
$P_{clk,ztr}$	celkové ztráty výkonového obvodu [W]
P_j	jmenovitý výkon motoru [W]
P_k	průměrný výkon motoru pro jízdu do kopce [W]
P_{max}	maximální výkon motoru [W]
P_o	výkon pro překonání odporové síly [W]
P_{pr}	příkon měniče [W]
P_r	průměrný výkon motoru pro jízdu po rovině [W]
P_t	trvalý výkon [W]
P_{tr}	výkon pro překonání třecí síly [W]
P_{vy}	výkon měniče [W]
$P_{ztr,p}$	střední ztrátový přepínací výkon tranzistoru [W]
$P_{ztr,v}$	ztráty způsobené vedením proudu tranzistorem [W]
r	poloměr kola [m]
$R_{DS(on)}$	odpor tranzistoru [$m\Omega$]

s	střída měniče [-]
S	čelní průřez (tříkolky s jezdcem) [m^2]
t_a	doba, po kterou je schopen akumulátor dodávat energii o výkonu P_a [s]
t_{off}	doba vypnutí tranzistoru [ns]
t_{on}	doba zapnutí tranzistoru [ns]
T_{DA}	spínací transistor (zapojení dolního spínače větve A)
T_{DB}	spínací transistor (zapojení dolního spínače větve B)
T_{HA}	spínací transistor (zapojení horního spínače větve A)
T_{HB}	spínací transistor (zapojení horního spínače větve B)
u	převodový poměr navrhnuté jednostupňové převodovky
u_Z	impulsní napětí na výstupních svorkách měniče [V]
U_a	napětí na svorkách akumulátoru [V]
U_d	vstupní napětí zdroje (napětí meziobvodu) [V]
U_{DSS}	průrazné napětí tranzistoru [V]
U_{fef}	efektivní hodnota síťového napětí [V]
U_i	indukované napětí stroje [V]
U_K	maximálně přípustné napětí na kondenzátoru [V]
U_n	napájecí napětí motoru [V]
U_{Sef}	efektivní hodnota sdruženého napětí [V]
U_Z	svorkové napětí motoru [V]
v	rychlost elektrické tříkolky [km/h]
v_l	maximální rychlost elektrické tříkolky při stoupání o sklonu β [km/h]
v_{max}	maximální rychlost elektrické tříkolky [km/h]
v_p	průměrná rychlost elektrické tříkolky [km/h]
v_{p1}	průměrná rychlost elektrické tříkolky po rovině [km/h]
v_{p2}	průměrná rychlost elektrické tříkolky do kopce [km/h]
w	převodový poměr mezi rotorem stejnosměrného motoru a osou hnaných kol [-]
W_{off}	ztrátová energie jednoho vypnutí tranzistoru [J]
W_{on}	ztrátová energie jednoho zapnutí tranzistoru [J]
z	převodový poměr mezi rotorem asynchronního motoru a osou hnaných kol [-]

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Elektrická tříkolka	19
Obr. 2.2: Elektromotor umístěn v náboji předního kola – tzv. Hub motor	20
Obr. 4.1: Schéma řešené soustavy	25
Obr. 4.2: Čelní pohled tříkolky s jezdcem proložený čtvercovou sítí	26
Obr. 4.3: Potřebný výkon P_t pro překonání odporových sil v závislosti na otáčkách	29
Obr. 4.4: Momentově – otáčková a výkonově – otáčková charakteristika pro pohon určený do terénu	31
Obr. 4.5: Momentově – otáčková a výkonově – otáčková charakteristika pro pohon určený do interiéru	32
Obr. 5.1: Typ Hub motoru bez převodu	34
Obr. 5.2: Hub motor s planetovou převodovkou	34
Obr. 5.3: Praktická ukázka zapojení elektromotoru v zadní části vozidla	35
Obr. 6.1: Rotorové vinutí asynchronního motoru	37
Obr. 6.2: Řez stejnosměrného motoru s mechanickým komutátorem (DC)	39
Obr. 6.3: Řez elektricky komutovaným stejnosměrným motorem (EC)	41
Obr. 7.1: Vytvoření jmenovitého bodu pro motor Siemens 1LA7 070 (určený do terénu)	46
Obr. 7.2: Vytvoření jmenovitého bodu pro motor Siemens 1LA7 060 (určený do interiéru)	46
Obr. 7.3: Asynchronní motor značky Siemens 1LA7 070	49
Obr. 7.4: Zátěžová charakteristika DC motoru Atas P2XR492 - určený do terénu	50
Obr. 7.5: Zátěžová charakteristika DC motoru Atas P2XR508 - určený do interiéru	51
Obr. 7.6: Navrhnutá jednostupňová převodovka od firmy Atas	52
Obr. 7.7: Stejnosemřný motor značky Atas P2XR508	53
Obr. 8.1: Ukázka gelového trakčního akumulátoru	58
Obr. 8.2: Sloučenina LiFePO_4	59

Obr. 8.3: Princip nabíjení a vybíjení Li-Ionového akumulátoru	59
Obr. 8.4: Vybíjecí charakteristika akumulátoru A123 systems.....	61
Obr. 8.5: Akumulátor LiFePO ₄ od firmy A123 Systems.....	64
Obr. 8.6: VRLA gelový akumulátor YUCELL PG26-12.....	64
Obr. 9.1: Jednotlivé kvadranty VA – roviny pro různé režimy zátěže	66
Obr. 9.2: Zapojení dolního spínače – měnič pracující v II. kvadrantu	67
Obr. 9.3: Zapojení horního spínače – měnič pracující v I. kvadrantu - STEP-DOWN.....	68
Obr. 9.4: Zapojení měniče STEP-UP	68
Obr. 9.5: Zapojení čtyřkvadrantového pulsního měniče	69
Obr. 13.1: Schéma řídicího obvodu.....	80
Obr. 13.2: Schéma řídicího obvodu.....	81

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Technické parametry elektrické tříkolky.....	27
Tab. 4.2: Výsledné parametry pro navrhovaný motor.....	29
Tab. 4.3: Úprava technických parametrů.....	30
Tab. 4.4: Výsledné parametry pro navrhovaný motor.....	30
Tab. 7.1: Technické parametry asynchronních motorů vhodných pro elektrickou tříkolku	45
Tab. 7.2: Srovnání původních a nových jmenovitých bodů pro navrhované motory	47
Tab. 7.3: Technické parametry stejnosměrných motorů s permanentními magnety.....	50
Tab. 7.4: Jmenovité výkony a účinnosti stejnosměrných motorů	51
Tab. 8.1: Požadované parametry pro návrhy akumulátorů.....	57
Tab. 8.2: Srovnání vlastností jednotlivých typů Li-Ion akumulátorů.....	60
Tab. 8.3: Parametry vytipovaných akumulátorů vhodných pro elektrickou tříkolku.....	63
Tab. 9.1: Technické parametry navržených DC motorů	70
Tab. 9.2: Parametry tranzistoru MOS – FET IRFS3207PBF.....	71
Tab. 10.1: Ceny za jednotlivé navrhnuté komponenty pro pohon elektrické tříkolky do terénu	75
Tab. 10.2: Ceny za jednotlivé navrhnuté komponenty pro pohon elektrické tříkolky do interiéru.....	75
Tab. 10.3: Prodejní cena komerčně dostupné elektrické tříkolky	76

Obsah

1. Úvod	18
2. Přehled současného stavu problematiky	19
3. Formulace problému a cílů řešení	21
4. Výpočet potřebného výkonu motoru elektrické tříkolky	22
4.1 Postup odvození P_{max}	22
4.1.1 Redukce hmotnostních parametrů	22
4.1.2 Redukce silových parametrů	23
4.2 Odvození obecného vztahu pro P_{max}	24
4.3 Výpočet čelního průřezu (tříkolky s jezdcem)	26
4.4 Návrh nejvhodnějšího výkonu motoru	27
4.4.1 Návrh výkonu motoru pro použití do terénu	27
4.4.2 Návrh výkonu motoru pro použití do interiéru	30
4.5 Vytvoření momentově – otáčkové charakteristiky	31
5. Koncepce pohonu	33
5.1 Motor v náboji předního kola (Hub motor)	33
5.2 Elektromotor v zadní části vozidla	34
6. Vhodná volba typu elektromotoru	36
6.1 Asynchronní motory (AC)	36
6.2 Synchronní motory	38
6.2.1 Synchronní stroj s elektromagnetickým buzením	38
6.2.2 Synchronní stroj s permanentními magnety	38
6.3 Stejnoseměrné motory	39
6.3.1 Stejnoseměrný motor s mechanickým komutátorem (DC)	39
6.3.2 Elektricky komutované stejnosměrné motory (EC)	40
6.3 Výběr vhodných typů	42
7. Návrh motoru pro elektrickou tříkolku	44
7.1 Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko	44
7.2 Návrh stejnosměrného motoru s permanentními magnety	50
7.3 Výběr vhodné varianty	53
8. Návrh akumulátoru pro elektrickou tříkolku	54
8.1 Postup výpočtu kapacity akumulátoru	54
8.2 Vhodné zdroje elektrické energie	57
8.2.1 Olověné akumulátory	58
8.2.2 Li-Ion akumulátory	59
8.2.3 Porovnání výhod a nevýhod typů akumulátorů	61
8.3 Vytipování vhodného akumulátoru	63

9. Návrh měniče pro elektrickou tříkolku	65
9.1 Pulsní měniče DC/DC (bez transformátoru)	65
9.2 Rozdělení pulsních měničů na základě pracovních kvadrantů	66
9.2.1 Pulsní měnič pracující v prvním kvadrantu (STEP-DOWN).....	67
9.2.2 Pulsní měnič zvyšující napětí (STEP-UP).....	68
9.3 Návrh pulsního měniče.....	69
9.3.1 Proudové a napěťové dimenzování	70
9.3.2 Výpočet ztrát výkonového obvodu	71
9.3.3 Výpočet výkonu pulsního měniče.....	73
9.3.4 Návrh kondenzátorů pro výkonový obvod.....	74
9.3.5 Snímač proudu.....	74
10. Celkové finanční náklady.....	75
11. Závěr.....	77
12. Použitá literatura	78
13. Přílohy	80

1. Úvod

V dnešní době se nabídka elektrických tříkolek značně rozšiřuje, a tak přispívá k vyšší mobilitě invalidních osob. Na dnešním trhu můžeme nalézt dva druhy tříkolek:

- Tříkolky bez elektrického pohonu
- Elektrické tříkolky (s elektrickým pohonem)

Tato práce se zabývá návrhy pohonu pro dva typy elektrických tříkolek. Aby parametry elektrické tříkolky v dostatečné míře vyhovovaly uživateli, tak byly provedeny návrhy pro následující dvě varianty:

- **Typ elektrické tříkolky vhodný do terénu** – vhodný na delší vyjížděky. Uživatel může s tříkolkou překonat středně těžký terén s převýšením. Výhodou je větší výkonnost pohonné soustavy a vyšší kapacita baterie. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena.
- **Typ elektrické tříkolky vhodný do interiéru** – určený pro užívání především v obytných místnostech a v areálech, kde se předpokládají nižší nároky na maximální rychlost, sklon stoupání apod. Výhodou je ve srovnání s předešlým typem nižší pořizovací náklady. Nevýhodou jsou omezené možnosti pohonné soustavy.

2. Přehled současného stavu problematiky

Elektrickou tříkolku (obr. 2.1) můžeme rozdělit na **mechanickou** a **elektrickou** část. Pod mechanickou část spadá celková konstrukce vozidla. Elektrickou část můžeme rozdělit na následující podčásti:

- Elektromotor
- Akumulátor
- Řídící obvody
- Výkonový obvod



Obr. 2.1: Elektrická tříkolka [1]

Elektromotor bývá umístěn buď v **náboji předního kola** (tzv. Hub motor – obr. 2.2), nebo v **zadní části vozidla**.

V následujících kapitolách se budeme elektrickými podčástmi tříkolky podrobně zabývat. Pro navržení koncepce celého pohonu bude naším prvním úkolem provést návrh vhodného elektromotoru.



Obr. 2.2: Elektromotor umístěn v náboji předního kola – tzv. Hub motor [1]

3. Formulace problému a cílů řešení

Cílem diplomové práce je nalezení nenákladného řešení pohonu elektrické tříkolky s ohledem na požadavky uživatele. Prvním úkolem bude nalézení požadované momentově-otáčkové (resp. výkonově-otáčkové) charakteristiky pohonu. Na základě této charakteristiky a požadavků uživatele pak porovnat použitelné elektrické stroje pro trakční pohon a vybrat ten nejvhodnější. S tímto motorem pak navrhnout vhodnou koncepci celého pohonu. Součástí práce bude také srovnání všech pro tuto aplikaci v úvahu připadajících akumulátorů energie a vytipování nejvhodnější technologie.

Cíle diplomové práce:

- vytvoření vhodné momentově-otáčkové resp. výkonově-otáčkové charakteristiky
- volba vhodného motoru s uvážením všech aspektů
- nalezení vhodné technologie akumulátoru el. energie pro tuto aplikaci
- návrh koncepce pohonu

4. Výpočet potřebného výkonu motoru elektrické tříkolky

Naším úkolem bude nejprve vypočítat maximální výkon motoru P_{max} (tzn. výkon, kterého je třeba dosáhnout při rozjezdu elektrické tříkolky na nakloněné rovině o určitém sklonu stoupání) a potom vypočteme hodnotu kroutícího momentu M_k (na ose hnaných kol), podle které bude možné stanovit správný převodový poměr mezi hřídelí motoru a osou hnaných kol. Schéma řešené soustavy je zobrazeno na obr. 4.1.

4.1 Postup odvození P_{max}

Pro vytvoření matematického modelu byla použita metoda redukce, kterou dělíme na redukci hmotnostních a silových parametrů. V této úloze redukuje na rám elektrické tříkolky. Redukci provádíme na translační pohyb podle vztahu [2]:

$$F_{red} = m_{red} \cdot a \quad (4.1)$$

Kde F_{red} je redukce silových parametrů

m_{red} je redukce hmotnostních parametrů

a je zrychlení elektrické tříkolky

4.1.1 Redukce hmotnostních parametrů

Redukce hmotnostních parametrů je stanovena na základě rovnosti kinetické energie soustavy před redukcí a kinetické energie soustavy po redukcii. Obecně platí vztah [2]:

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot v_i + \sum_{j=1}^m M_j \cdot \omega_j = F_{red} \cdot v \quad (4.2)$$

Po dosažení konkrétních veličin dostaneme rovnici:

$$\frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot m_t \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot m_4 \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot I_4 \cdot \omega_4^2 + 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot v^2 + 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot I_3 \cdot \omega_3^2 = \frac{1}{2} \cdot m_{red} \cdot v^2 \quad (4.3)$$

Kde m_t je hmotnost elektrické tříkolky bez motoru

m_2 je hmotnost uživatele

m_3 je hmotnost kola

m_4 je hmotnost motoru

I_3 je moment setrvačnosti kola

I_4 je moment setrvačnosti motoru

v je rychlost elektrické tříkolky

ω_3 je úhlová rychlost kola

ω_4 je úhlová rychlost hřídele motoru

Po příslušné úpravě dostaneme vztah:

$$m_{red} = m_1 + m_2 + 3 \cdot I_3 \cdot \frac{1}{r^2} \quad (4.4)$$

Kde r je poloměr kola

m_1 je hmotnost elektrické tříkolky

$$m_1 = m_t + m_4 + 3 \cdot m_3 \quad (4.5)$$

Moment setrvačnosti motoru I_4 můžeme zanedbat a pro moment setrvačnosti kola I_3 užíváme vztah:

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot r^2 \quad (4.6)$$

Konečný vztah pro m_{red} je pak ve tvaru:

$$m_{red} = m_1 + m_2 + \frac{3}{2} \cdot m_3 \quad (4.7)$$

4.1.2 Redukce silových parametrů

Redukce silových parametrů je stanovena na základě rovnosti výkonů nebo prací silové soustavy působící na soustavu před redukcí a po redukcí soustavy. Obecně platí vztah [2]:

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot v_i + \sum_{j=1}^m M_j \cdot \omega_j = F_{red} \cdot v \quad (4.8)$$

Po dosazení konkrétních veličin dostaneme rovnici:

$$M_k \cdot \omega_3 - F_T \cdot v - F_t \cdot v = F_{red} \cdot v \quad (4.9)$$

Kde M_k je kroutící moment kola

F_T je tíhová síla, která působí na elektrickou tříkolku v ose x

F_t je valivý odpor kol

$$F_T = F_G \cdot \sin \beta = 1079,1 \cdot \sin 10^\circ \doteq 187,33N \quad (4.10)$$

$$F_t = \frac{\xi \cdot F_N}{r} \quad (4.11)$$

$$F_G = (m_1 + m_2) \cdot g \quad (4.12)$$

$$F_N = (m_1 + m_2) \cdot g \quad (4.13)$$

Kde F_G je tíhová síla

β je sklon stoupání

ξ je součinitel valivého tření

F_N je normálová síla

g je gravitační zrychlení

Konečný vztah pro F_{red} je pak ve tvaru:

$$F_{red} = \frac{M_k}{r} - F_T - F_t \quad (4.14)$$

Podílem krotícího momentu a poloměru kola dostaneme tažnou sílu F , která je rovna součtu F_{red} , tíhové síly působící v ose x a síly třecí.

4.2 Odvození obecného vztahu pro P_{max}

Jestliže uvážíme, že výkon poháněných kol je roven výkonu motoru, pak výsledný výkon můžeme vyjádřit ve vztahu [2]:

$$P = M_k \cdot \omega_3 \quad (4.15)$$

Ztráty v převodech neuvažujeme. Ze vztahu 4.14 pro výpočet redukce silových parametrů vyjádříme krotící moment kola. Po úpravě pak dostaneme vztah:

$$M_k = F_{max} \cdot r \quad (4.16)$$

$$F_{max} = F_{red} + F_T + F_t \quad (4.17)$$

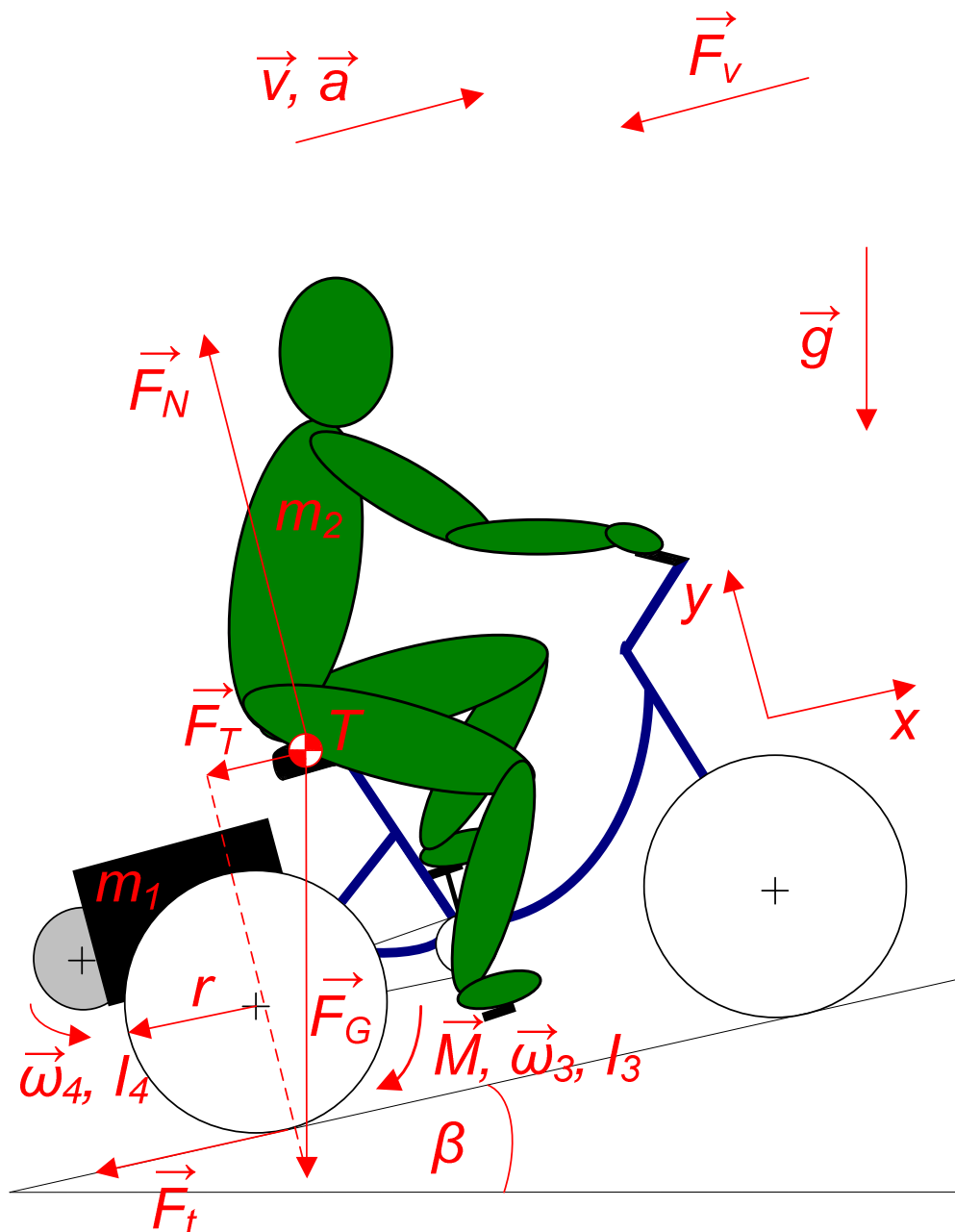
Kde F_{max} je max. tažná síla (potřebná pro rozjezd vozidla do kopce o sklonu stoupání β)

4. Návrh nejvhodnějšího výkonu motoru elektrické tříkolky

Po dosazení a úpravě pak dostaneme konečný vztah pro P_{max} ve tvaru:

$$P_{max} = (F_{red} + F_T + F_t) \cdot v \quad (4.18)$$

Jestliže bude motor elektrické tříkolky dosahovat tohoto výkonu, pak se bude schopen rozjet z klidové polohy na rychlost v a to zrychlením a do kopce o sklonu stoupání β . Do výpočtu nezahrnujeme odpor prostředí, jelikož se elektrická tříkolka pohybuje nízkou rychlostí.



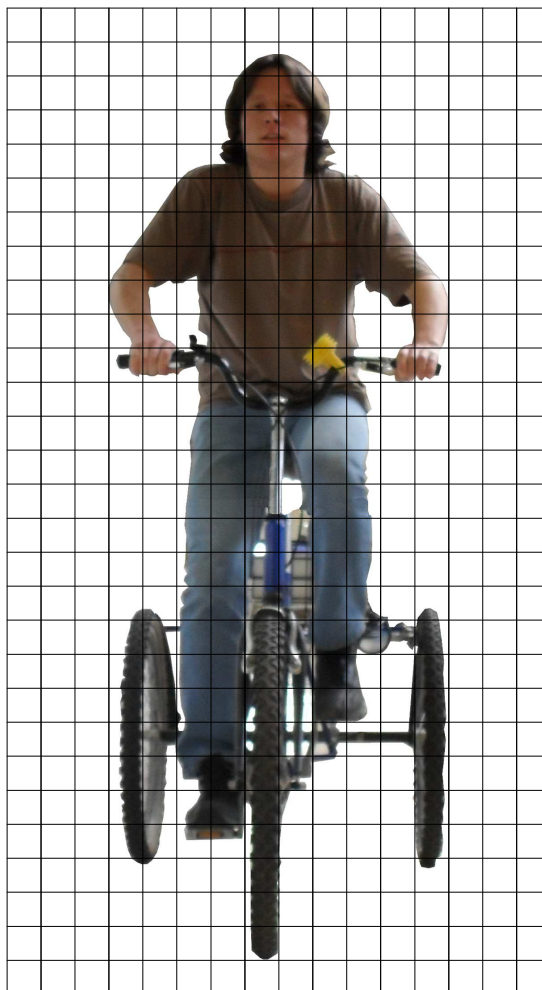
Obr. 4.1: Schéma řešené soustavy

4.3 Výpočet čelního průřezu (tříkolky s jezdcem)

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro výpočet maximálního výkonu potřebného pro rozjezd vozidla můžeme zanedbat odporovou sílu F_v (nízká rychlost). Při vyšších rychlostech už ale budeme muset s touto silou počítat. V našem případě bylo nutné nejprve vypočítat čelní průřez S , jehož hodnotu jsme získali z obr. 4.2, který byl proložen čtvercovou sítí. Jeden čtverec představuje ve skutečnosti velikost $8,5 \times 8,5 \text{ cm}$ (tedy dosahuje plochy $72,3 \text{ cm}^2$). Jestliže vynásobíme plochu jednoho čtverce počtem všech obsazených polí (částečně obsazená pole počítáme jako poloviční), pak dostaneme přibližnou hodnotu čelního průřezu S .

Tříkolka s jezdcem zaujímá celkem 157 polí, přičemž 49 z nich jsou obsazena jen z části. Čelní průřez tedy dostaneme jako:

$$S = 108 \cdot 0,00723 + 49 \cdot 0,00362 \doteq \underline{\underline{0,96 \text{ m}^2}} \quad (4.18)$$



Obr. 4.2: Čelní pohled tříkolky s jezdcem proložený čtvercovou sítí

4.4 Návrh nejvhodnějšího výkonu motoru

Po obecném odvození rovnice můžeme přistoupit ke konkrétnímu návrhu nejvhodnějšího maximálního výkonu P_{max} a trvalého výkonu P_t motoru pro elektrickou tříkolku.

4.4.1 Návrh výkonu motoru pro použití do terénu

Před výpočtem výkonů si můžeme uvést potřebné fyzikální konstanty a technické parametry elektrické tříkolky.

Veličina:	Hodnota:
Hmotnost elektrické tříkolky m_1	30 kg
Hmotnost uživatele m_2	80 kg
Hmotnost kola m_3	1.5 kg
Maximální rychlost v_{max} elektrické tříkolky	5,56 m/s
Maximální rychlost v_1 elektrické tříkolky při stoupání o sklonu β	1.39 m/s
Maximální zrychlení a elektrické tříkolky při stoupání o sklonu β	0.278 m/s ²
Poloměr kola r	0.23 m
Sklon stoupání β	10°
Součinitel valivého tření ξ (mezi pryžovým kolem a asfaltem)	0.0016 m
Součinitel odporu C_s (použili jsme stejný jako u jízdního kola)	0,7
Hustota prostředí ρ	1,29 kg/m ³
Čelní průřez tříkolky s jezdcem S	0,96 m ²

Tab. 4.1: Technické parametry elektrické tříkolky (hodnoty převzaty z [3], nebo voleny autorem)

Výpočet výkonu P_{max} :

$$F_{red} = m_{red} \cdot a = 112,25 \cdot 0,278 \doteq 31,21N \quad (4.19)$$

$$m_{red} = m_1 + m_2 + \frac{3}{2} \cdot m_3 = 30 + 80 + \frac{3}{2} \cdot 1,5 = 112,25kg \quad (4.20)$$

$$F_T = F_G \cdot \sin \beta = 1079,1 \cdot \sin 10^\circ \doteq 187,33N \quad (4.21)$$

$$F_t = \frac{\xi \cdot F_N}{r} = \frac{0,0016 \cdot 1079,1}{0,23} \doteq 7,51N \quad (4.22)$$

$$P_{max} = (F_{red} + F_T + F_t) \cdot v_1 = (31,21 + 187,33 + 7,51) \cdot 1,39 \doteq \underline{\underline{314,21W}} \quad (4.23)$$

Bylo dosaženo tak maximálního výkonu, který budeme od motoru elektrické tříkolky požadovat. Nejvhodnější výkon je roven maximálnímu výkonu P_{max} , jelikož dosahuje potřebné velikosti a zároveň nemá příliš velkou výkonostní rezervu, která by se mohla výrazně projevit v ceně navrhovaného motoru.

Výpočet výkonu P_t :

Trvalým výkonem P_t máme namysli takový výkon, který je potřebný pro jízdu po rovině s ustálenou maximální rychlostí. Pro jeho dosažení je třeba překonat valivé tření a odpor prostředí. Pro výpočet tedy platí [3]:

$$P_t = (F_t + F_v) \cdot v_{max} \quad (4.24)$$

Kde F_v je odpor prostředí

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \rho \cdot S \cdot v_{max}^2 \quad (4.25)$$

Kde C_s je součinitel odporu

ρ je hustota prostředí

S je čelní průřez tříkolky s jezdcem

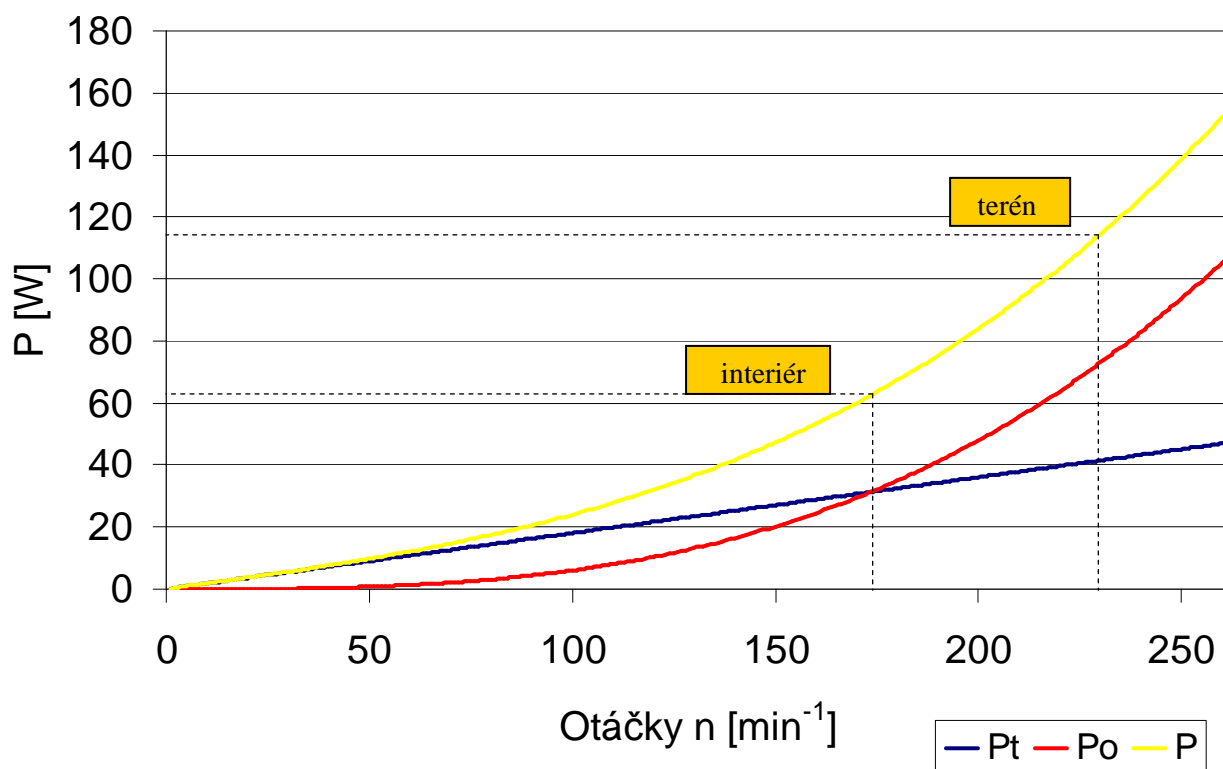
$$F_v = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \rho \cdot S \cdot v_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 1,29 \cdot 0,96 \cdot 5,56^2 \doteq 13,4N \quad (4.26)$$

$$P_t = (F_t + F_v) \cdot v_{max} = (7,51 + 13,4) \cdot 5,56 \doteq \underline{\underline{116,26W}} \quad (4.27)$$

Veličina:	Hodnota:
Maximální výkon P_{max}	314,21 W
Trvalý výkon P_t	116,26 W
Hmotnost elektrické tříkolky (s jezdcem)	110 kg

Tab. 4.2: Výsledné parametry pro navrhovaný motor

Z výsledků je patrné, že nejvyšší výkon je od motoru požadován při rozjezdu do stoupání, který bude potřeba jen v krátkém časovém úseku. Tomu odpovídá maximální výkon P_{max} . K udržení rovnoměrné rychlosti po rozjezdu stačí pohonné soustavě překonávat odpor prostředí a valivé tření, což také dokazuje mnohem nižší hodnota dosažená pro trvalý výkon P_t . Na obrázku 4.3 je zobrazena závislost výkonu P_t (součtu výkonu P_{tr} pro překonání třecí síly a výkonu P_o pro překonání odporové síly) na otáčkách.

Obr. 4.3: Potřebný výkon P_t pro překonání odporových sil v závislosti na otáčkách

4.4.2 Návrh výkonu motoru pro použití do interiéru

Výpočet potřebných parametrů je založen na stejném principu. Změní se nám však některé technické parametry, které jsou zobrazeny v tab. 4.3.

Veličina:	Hodnota:
Maximální rychlost v_{max} elektrické tříkolky	4,17 m/s
Sklon stoupání β	5°

Tab. 4.3: Úprava technických parametrů

Výpočet výkonu P_{max} :

$$F_T = F_G \cdot \sin \beta = 1079,1 \cdot \sin 5^\circ \doteq 94,05N \quad (4.28)$$

$$P_{max} = (F_{red} + F_T + F_t) \cdot v_1 = (31,21 + 94,05 + 7,51) \cdot 1,39 \doteq \underline{\underline{184,55W}} \quad (4.29)$$

Výpočet výkonu P_t :

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \rho \cdot S \cdot v_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 1,29 \cdot 0,96 \cdot 4,17^2 \doteq 7,5N \quad (4.30)$$

$$P_t = (F_t + F_v) \cdot v_{max} = (7,51 + 7,5) \cdot 4,17 \doteq \underline{\underline{62,75W}} \quad (4.31)$$

Veličina:	Hodnota:
Maximální výkon P_{max}	184,55 W
Trvalý výkon P_t	62,75 W
Hmotnost elektrické tříkolky (s jezdcem)	110 kg

Tab. 4.4: Výsledné parametry pro navrhovaný motor

Pro výše uvedený návrh byl zvolen o polovinu menší sklon stoupání a maximální rychlost, což se také projevilo ve výsledných hodnotách. Z obr. 4.3 je patrné, že v maximálních otáčkách 174 min^{-1} je potřeba trvalého výkonu $P_t = 62,75 \text{ W}$.

4.5 Vytvoření momentově – otáčkové charakteristiky

Na základě vypočtených hodnot můžeme vytvořit momentově – otáčkovou (respektive výkonově – otáčkovou) charakteristiku na hnaném kole vozidla. Z výše uvedených vztahů byl odvozen vztah pro výpočet maximální tažné síly F_{max} . Pro výpočet kroutícího momentu M_k pak platí vztah 4.32. Pro vynesení průběhů je třeba převést rychlost tříkolky na otáčky kol (4.33) [2].

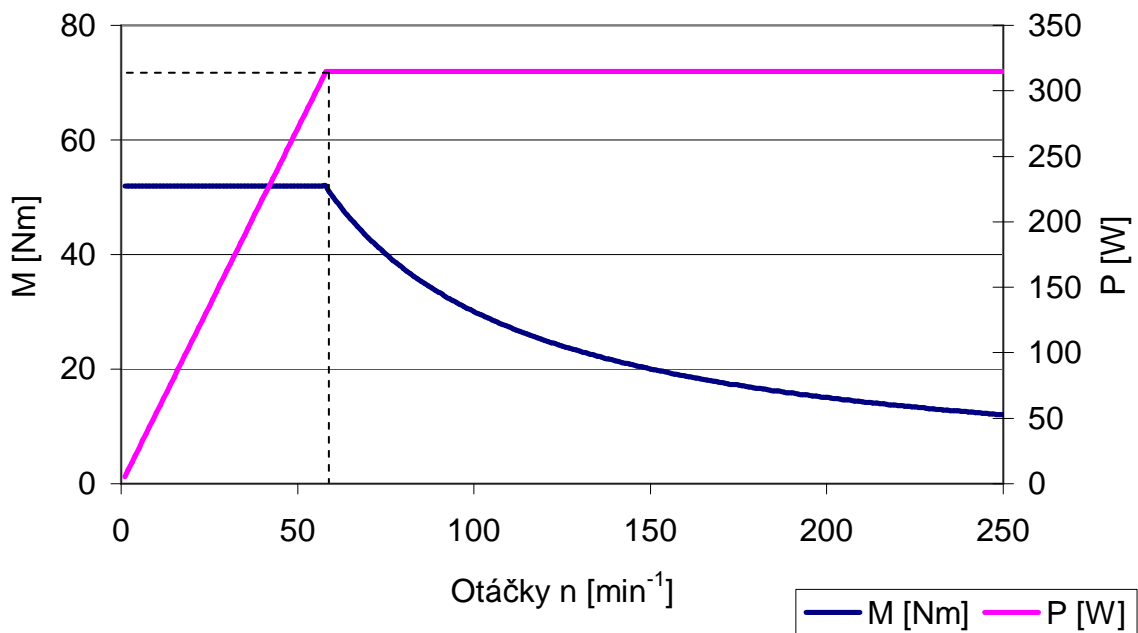
$$M_k = F_{max} \cdot r \quad (4.32)$$

$$n = \frac{60 \cdot v}{o} \quad (4.33)$$

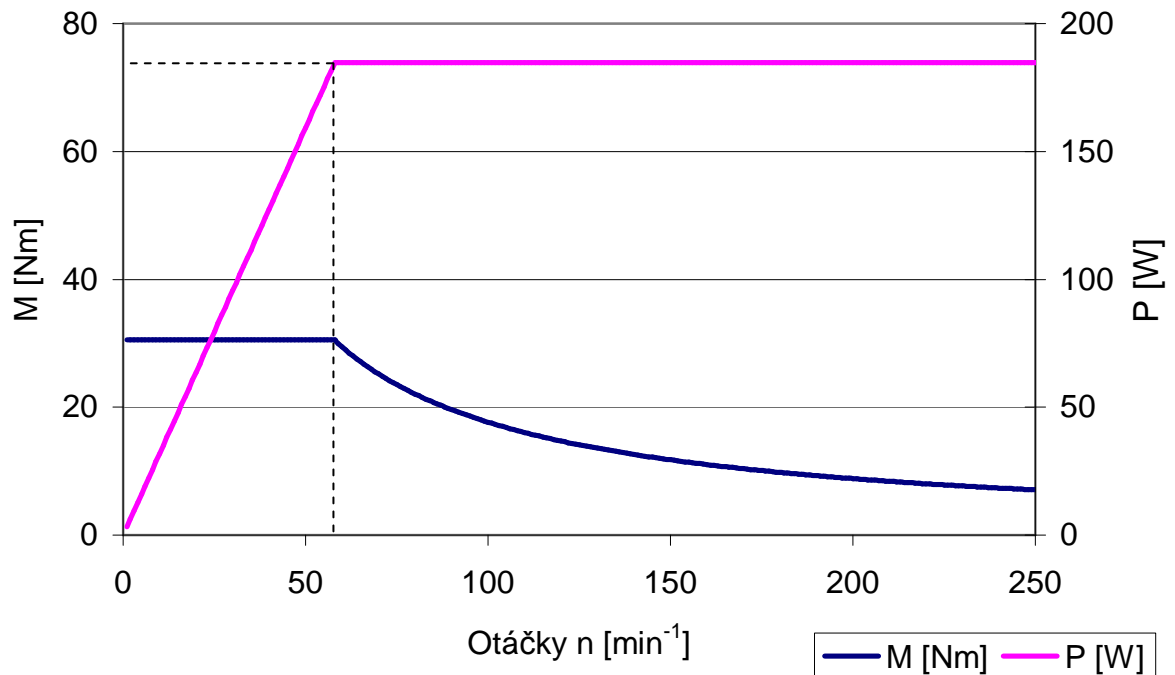
Kde n jsou otáčky kol za minutu

o je obvod kola

Byly vytvořeny celkem dvě charakteristiky (pro pohon do terénu a interiéru).



Obr. 4.4: Momentově – otáčková a výkonově – otáčková charakteristika pro pohon určený do terénu



Obr. 4.5: Momentově – otáčková a výkonově – otáčková charakteristika pro pohon určený do interiéru

Níže uvedený popis znázorňuje charakteristiku pro pohon do terénu (popis druhé charakteristiky je ekvivaletní).

V první fázi se vozidlo pohybuje z nulové rychlosti zrychlením a po dobu 5 s. Tomu odpovídá **maximální tažná síla** $F_{max} = 226 \text{ N}$ a **konstantní kroutící moment** $M_k = 52 \text{ Nm}$. Výsledná hodnota momentu je dost vysoká, jelikož je počítáno s nejobtížnější situací, kdy se vozidlo bude rozjíždět do kopce. Tím zaručíme, že bude tříkolka schopna zdolávat i prudší stoupání bez přispění fyzické síly uživatele.

Jmenovitý bod se nachází na hodnotě maximálního výkonu zhruba 315 W při otáčkách 58 min^{-1} . V další fázi zůstává výkon konstantní a kroutící moment s rostoucími otáčkami klesá. V maximálních otáčkách hnaného kola dosahuje moment hodnoty 13 Nm .

5. Koncepce pohonu

Dalším důležitým krokem pro návrh pohonné soustavy je vytvoření koncepce pohonu. V tomto případě máme na mysli vhodné navržení motoru a převodovky. Koncepci lze rozdělit na dvě základní varianty [4]:

- **Návrh motoru s vícešupňovou převodovkou** – používá se v případě, kdy je vyžadována vysoká maximální rychlost vozidla. S rostoucím jmenovitým momentem motoru se zvětšuje jeho hmotnost, která by při nepoužití převodů musela být příliš velká. Při návrhu je třeba brát ohled na velikost a hmotnost převodové soustavy.
- **Návrh motoru s pevným převodem** – Nalezením vhodného převodového poměru můžeme zvýšit požadovaný jmenovitý moment. Otáčky poháněných kol se mění jen na základě zvyšování, či snižování napětí na vstupu soustavy. Při použití pevného převodu nemusíme navrhovat vícešupňovou převodovku, což je z finančního i konstrukčního hlediska velká výhoda.

Pro naše účely je návrh vícešupňové převodové soustavy nadbytečný, neboť elektrická tříkolka nebude dosahovat velkých rychlostí (maximální rychlost do 20 km/h) a bude tedy plně postačující motor s pevným převodem. Motor elektrické tříkolky může být umístěn buď v **náboji předního kola**, nebo situován v **zadní části vozidla**.

5.1 Motor v náboji předního kola (*Hub motor*)

Motor v náboji předního kola, nazýván také jako Hub motor, je velmi často používán u elektrokol. Jedná se o bezkartáčové elektromotory (stejnoseměrné nebo synchronní) s permanentními magnety. Výhodou je nízká hlučnost, dobrý design a minimální údržba. Hub motory jsou vybaveny planetovou převodovkou, nebo se vyrábí bez převodu.

Typy, které nejsou vybaveny převodovým poměrem, dosahují sice vyšších výkonů (řádově do $1000W$ [6]), ale musí se vyrábět o velkém průměru a hmotnosti, aby dosáhly požadovaného jmenovitého momentu. I přesto většinou slouží jen jako vedlejší pohon usnadňující uživateli šlapání například do kopce (Obr. 5.1).

Motory s planetovou převodovkou jsou v průměru menší, ale zato širší. Pevným převodem se redukuje otáčky a zvyšuje kroutící moment, takže hmotnost motoru bývá až o polovinu menší. Nevýhodou je ovšem pořizovací cena, která bývá u těchto typů poměrně vysoká. Zavedením převodovky se také snižuje účinnost (vlivem tření) a zvyšuje hlučnost (Obr. 5.2) [5].



Obr. 5.1: Typ Hub motoru bez převodu [6]



Obr. 5.2: Hub motor s planetovou převodovkou [6]

5.2 Elektromotor v zadní části vozidla

Motor je v tomto případě upevněn k zadní části rámu. Výkon na hřídeli je převeden pevným převodovým poměrem na osu zadních kol. Redukcí otáček se zlepšují nároky na jmenovitý moment. Navržený pohon bude proto sloužit nejen jako pomocná hnací síla při šlapání (jak tomu bývá u některých typech elektrokol), ale stane se hlavním pohonem, který zajistí uživateli minimální fyzickou zátěž. Výhodou je dobrá stabilita vozidla a také lepší jízdní vlastnosti v těžších terénech (např. sníh nebo bláto), jelikož nedochází tak často

k prokluzování kol. Další výhodou ve srovnání s Hub motorem je nižší pořizovací cena. Mezi nevýhody můžeme řadit například vyšší nároky na údržbu pohonu a horší design. Na obr. 5.3 je zobrazena uvedená možnost přímo v praxi.



Obr. 5.3: Praktická ukázka zapojení elektromotoru v zadní části vozidla [7]

Shrnutí:

Umístění elektromotoru v zadní části vozidla je pro návrh elektrické tříkolky mnohem efektivnější. Pomocí správného převodového poměru je možno docílit velikosti jmenovitého momentu motoru jako je požadovaná maximální hodnota momentu na ose zadních kol. Další výhodou je také snadnější návrh řízení [4].

6. Vhodná volba typu elektromotoru

Vhodně zvolený motor splňuje s minimálními náklady statické i dynamické požadavky, aniž by se při provozu nadměrně oteploval. Mezi důležitá hlediska můžeme zařadit například hmotnost motoru na jednotku výkonu, nebo vysoký poměr jmenovitého momentu ku hmotnosti a rozměrům. K základním parametrům motoru patří rozběhový moment, který určuje zrychlení poháněné soustavy a dynamiku její funkce. Dalším důležitým parametrem je vysoká účinnost motoru v širokém rozsahu momentu a otáček [8].

Elektromotory můžeme rozdělit na tři základní typy [9]:

- Asynchronní motory
- Synchronní motory
- Stejnoseměrné motory

V dalších kapitolách jsou uvedeny vlastnosti typů elektromotorů vhodné pro návrh a na základě porovnání výhod a nevýhod jsou vybrány nejvhodnější.

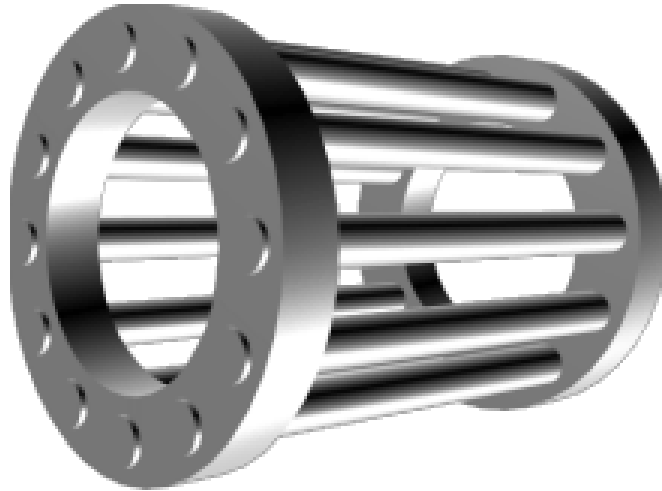
6.1 Asynchronní motory (AC)

Asynchronní stroje patří v průmyslové oblasti mezi nepoužívanější typy strojů. Trojfázový asynchronní motor můžeme rozdělit podle provedení rotorového vinutí na [9]:

- Motor s klecovým rotorem (s kotvou nakrátko)
- Motor s vinutým rotorem (s rotorem s vinutím vyvedeným na kroužky)

Použití motoru s vinutým rotorem je nevhodným řešením. Existence kartáčů je zbytečnou komplikací a nevýhodou [10].

Motor s kotvou nakrátko je bezkartáčový stroj a tak je pro náš návrh mnohem přijatelnější. V drážkách rotoru jsou uloženy vodivé tyče, které jsou spojené na čelních stranách kruhy nakrátko (obr. 6.1). Pro dosažení maximálního momentu zvratu je nutné docílit co nejnižšího odporu klece vinutí a rozptylové indukčnosti [10].



Obr. 6.1: Rotorové vinutí asynchronního motoru [9]

Ve statoru je trojfázové vinutí, které vytváří točivé pole. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera, která vytváří prostor pro pohyb rotoru [11].

Výhody [10]:

- Nízká technologická náročnost
- Možnost odbuzení ve vysokých otáčkách (z toho vyplývá omezení hysterezích a vířivých ztrát ve statoru a odstranění vysokého indukovaného napětí při vysokých otáčkách)
- Provedení asynchronního motoru s kotvou nakrátko je nenáročné na údržbu
- Cena motoru je relativně nízká
- Výroba je pro výkony v širokém rozsahu

Nevýhody [10]:

- Nevýhodou je potřeba buzení ze statoru (u nízkého napětí to způsobuje velký magnetizační proud, který zatěžuje výkonové polovodiče DC/AC střídače)
- Složitá řídicí elektronika
- Malý poměr momentu k hmotnosti

Závěr:

- Asynchronní motor s kotvou nakrátko je možným řešením

6.2 Synchronní motory

Název motoru je odvozen od toho, že se rotor otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Na statoru bývá většinou trojfázové vinutí. Na rotoru je umístěno budící vinutí, které je napájené stejnosměrným proudem (tvoří elektromagnet), nebo může být tvořen z permanentního magnetu se třídavě uspořádanými póly po obvodě. Synchronní stroje můžeme rozdělit na [8]:

- Synchronní stroj s elektromagnetickým buzením
- Synchronní stroj s buzením permanentními magnety

Na stator je přiveden střídavý proud, čímž vytváří pulsní, nebo častěji rotující magnetické pole. Rotor se snaží udržet stálou polohu vůči otáčivému magnetickému poli ve statoru až do kritického kroutícího momentu. Rotor si vzhledem k poli statoru udržuje skluz o úhel podle zátěže [8].

6.2.1 Synchronní stroj s elektromagnetickým buzením

Synchronní stroj s elektromagnetickým buzením je pro náš návrh nevhodný. Hlavními důvody jsou [10]:

- Abychom docílili minimálních rozměrů magnetického obvodu statoru s ohledem na požadovaný moment je třeba zajistit malý vliv reakčního pole statoru ve srovnání s budícím polem rotoru (pak je zapotřebí docílit nízké magnetické vodivosti magnetického obvodu stroje)
- Z výše uvedených důvodů je zapotřebí konstrukce velké vzduchvé mezery a z toho vyplývající velké rozměry stroje, které jsou pro náš návrh nevyhovující

Závěr:

- Synchronní stroj s elektromagnetickým buzením je nevhodným řešením

6.2.2 Synchronní stroj s permanentními magnety

Výhody [10]:

- Na rozdíl od předchozího typu není zapotřebí volit velkou vzduchovou mezeru, jelikož buzením pomocí permanentních magnetů ze vzácných zemin docílíme velkého magnetického napětí při dané indukci. Tím umožníme vybudit potřebnou indukci v magnetickém obvodu stroje bez potřeby velké vzduchové mezery
- Na základě nízké magnetické vodivosti je výhodou malá indukčnost vinutí

Nevýhody [10]:

- Nevýhodou je nemožnost odbuzení stroje
- Vznikají neodstranitelné hystrezní a vířivé ztráty ve statoru

Závěr:

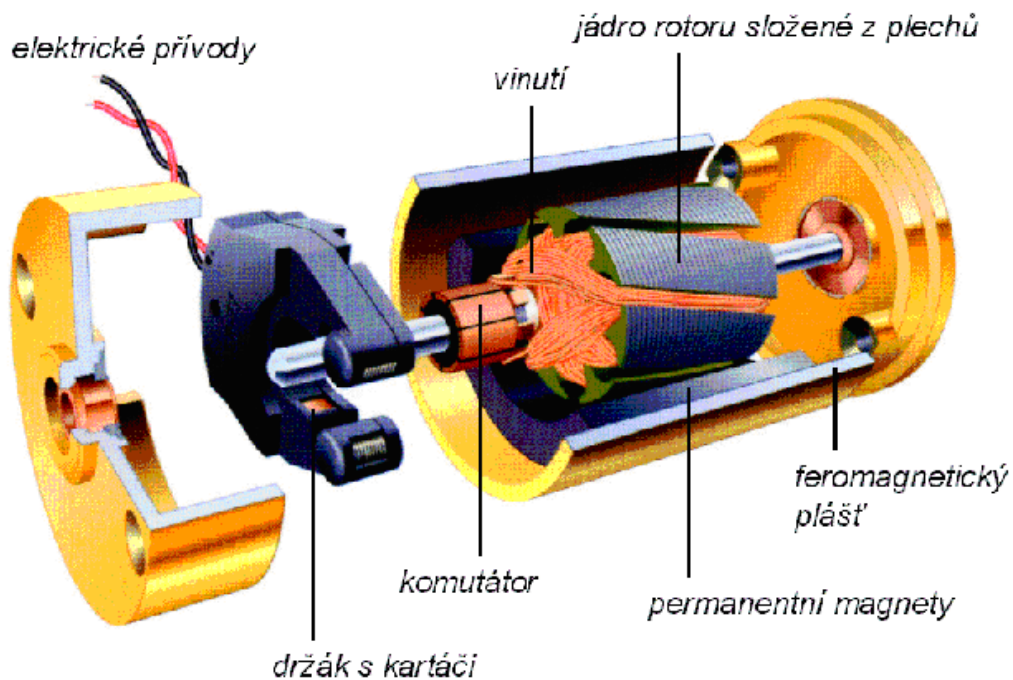
- Synchronní stroj s buzením permanentními magnety je možným řešením

6.3 Stejnosměrné motory

Stejnosměrné stroje se vyrábí buď s **mechanickými komutátory (DC)**, nebo využívají **elektrickou komutaci (EC)** – jedná se o tzv. bezkartáčové stejnosměrné motory.

6.3.1 Stejnosměrný motor s mechanickým komutátorem (DC)

Běžné uspořádání DC motoru je zobrazeno na obr. 6.2. Motor obsahuje vinutí v drážkách železného rotoru a permanentní magnet je situován vně. Stroj je složen ze statoru a rotoru. Na pólech statoru se nachází budící vinutí, které je napájené stejnosměrným proudem. V drážkách rotoru je vinutí kotvy, která má cívky připojeny ke komutátoru. Na komutátor přiléhají kartáče, které do kotvy přivádí nebo z kotvy odvádí elektrický proud [9].



Obr. 6.2: Řez stejnosměrného motoru s mechanickým komutátorem (DC) [12]

Výhody [4]:

- dosahují menších rozměrů a hmotnosti ve srovnání se střídavými motory stejného výkonu
- má výhodné regulační vlastnosti (lineární mechanické a většinou i regulační charakteristiky)
- dosahuje vysoké účinnosti při jmenovitém momentu
- jednodušší a levnější měnič (ve srovnání s měniči potřebnými pro střídavé motory)

Nevýhody [4]:

- nutnost kluzných kontaktů mezi kartáči a komutátorem (způsobuje elektromagnetické rušení a poruchy)
- zběrací ustrojí potřebuje pravidelnou údržbu (čistění komutátoru, výměna a zabrušování kartáčů)
- při vysokých otáčkách vznikají vířivé a hysterezní ztráty v magnetickém obvodu

Závěr:

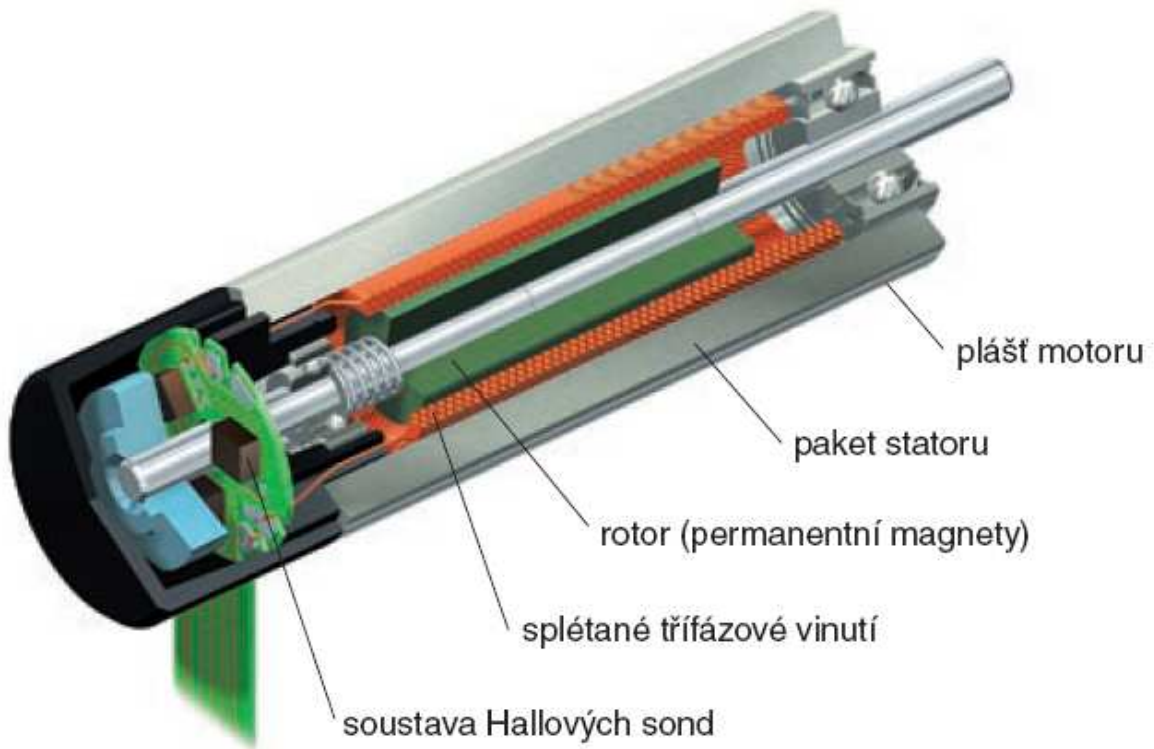
- stejnosměrný motor (DC) je možným řešením

6.3.2 Elektricky komutované stejnosměrné motory (EC)

S rozvojem elektrotechniky vznikla elektronická komutace a s ní také elektricky komutované motory (tzv. bezkartáčové stejnosměrné motory). Klasický stejnosměrný motor má magnety umístěné ve statoru a vinutí na rotoru, kdežto EC motor má uspořádání opačné – magnety jsou umístěny na rotoru a vinutí na statoru.

Stator EC motoru je podobný standardnímu statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje. V drážkách statoru je umístěno třífázové vinutí.

Konstrukce rotoru bývá provedena buď s magnety na povrchu (zabrání tak koncentraci magnetického toku a magnetická indukce v mezeře se rovná indukci permanentních magnetů), nebo s magnety situovanými uvnitř rotoru. Z magnetických materiálů je užíváno vzácných zemin (např. neodym – železo – bor, samarium - kobalt), nebo levnějších tvrdých feritů. Uspořádání EC motoru je zobrazeno na obr. 6.3 [13].



Obr. 6.3: Řez elektricky komutovaným stejnosměrným motorem (EC) [12]

Důležitou součástí EC motorů je řídicí jednotka. Snímač, který zahrnuje soustavu Hallových sond (obr. 6.3), zaznamenává polohu rotoru a na základě těchto informací pak řídicí jednotka spíná proud do sekcí vinutí [13].

Výhody [14]:

- platí stejné výhody, které byly uvedeny pro DC motor
- zvýšení životnosti motoru zavedením elektronické komutace (odpadají tím komplikace s údržbou komutátoru a kartáčů)

Nevýhody [14]:

- vyšší pořizovací cena ve srovnání s DC motorem
- složitá konstrukce motoru

Závěr:

- stejnosměrný motor (EC) je možným řešením

6.3 Výběr vhodných typů

V předchozích kapitolách byly uvedeny vlastnosti jednotlivých typů elektromotorů. Ze všech výše uvedených tedy připadají v úvahu:

- asynchronní motor s kotvou nakrátko
- synchronní motor s buzením permanentními magnety
- stejnosměrný motor s permanentními magnety (DC)
- elektricky komutovaný stejnosměrný motor (EC)

Ze zmíněných čtyř variant následně vybereme dvě nejvhodnější, u kterých v následujících kapitolách provedeme hlubší studii, vytipujeme konkrétní motor (komerčně dostupný), nalezneme jeho jmenovitý bod.. apod.

U asynchronních a synchronních motorů je třeba použít DC/AC střídač, který je technicky i cenově mnohem náročnější než DC/DC měnič u stejnosměrných motorů. Také návrh řízení je mnohem komplikovanější. Výhodou je však mnohem lepší účinnost ve vyšších otáčkách a nenáročnost na údržbu. S přihlédnutím na výše uvedené klady a zápory bude vhodné vybrat jeden typ ze skupiny motorů napájené střídavým proudem a druhý z dvojice stejnosměrných motorů.

Synchronní motor s buzením permanentními magnety má v porovnání s asynchronním motorem [15]:

Výhody:

- menší hmotnost, moment setrvačnosti a objem
- vyšší účinnost
- velká momentová přetížitelnost

Nevýhody:

- vyšší pořizovací cena
- složitější technologie výroby a oprav
- nemožnost stroj odbudít

Vlivem nemožnosti odbuzení motoru vznikají také při výběhu ztráty vířivými proudy. Asynchronní motor je cenově přijatelnější a ve vysokých otáčkách je ho možné odbudít. Má ovšem malý poměr momentu k hmotnosti a ve srovnání se synchronním motorem má nižší účinnost. Výhodou je také nižší technologická náročnost. Jestliže vezmeme v úvahu, že k

vysoké ceně synchronního motoru budeme muset pořídit DC/AC střídač, je tato volba z finančního hlediska neefektivní.

U elektricky komutovaného stejnosměrného motoru je stěžejní výhodou jeho elektrický komutátor, jehož vlivem dochází ke zvýšení životnosti (odpadá údržba komutátoru a kartáčů).

Stejnosemřný motor s mechanickým komutátorem je mnohem levnější a konstrukčně jednodušší. Životnost kartáčů je odhadována zhruba na 4000 pracovních hodin. Jestliže vezmeme v úvahu, že bude motor v provozu průměrně dvě hodiny denně, pak je schopen sloužit cca necelých 6 let. Pro splnění požadavku nízké ceny a jednoduchosti řízení je přijatelnější druhá varianta, tedy motor s permanentními magnety [16].

Z toho vyplývají dvě nejvhodnější varianty:

- asynchronní motor s kotvou nakrátko (AC)
- stejnosměrný motor s permanentními magnety (DC)

7. Návrh motoru pro elektrickou tříkolku

7.1 Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Pro návrh motoru je zapotřebí nejprve určit vhodný počet pólů, pak z dostupných zdrojů nalézt nejvhodnější motor, určit nový jmenovitý bod a případně provést převinutí motoru.

Určení počtu pólů:

Počet pólů volíme na základě následujících kritérií [10]:

- Počet pólů nemá po teoretické stránce vliv na poměr mezi velikostí motoru a jmenovitým momentem. S rostoucím počtem pólů však dochází v praxi k patrnému nárůstu momentu (na základě lepšího využití magnetického obvodu statoru), a to především při změně dvoupólového stroje na čtyřpólový.
- Velikost motoru závisí na jmenovitém momentu (nikoliv na výkonu).
- Při možnosti měnit kmitočet nám tím odpadá zdánlivá výhoda většího výkonu stroje s menším počtem pólů, která je platná pro provoz s pevným síťovým kmitočtem.
- S rostoucím počtem pólů (při daném stejném výkonu a momentu) roste kmitočet při stejném sycení. Důsledkem je nárůst ztrát v železe statoru.

S rostoucím počtem pólů se zvyšuje poměr momentu k hmotnosti, ale zároveň také rostou ztráty v železe statoru. Vhodným řešením je proto **čtyřpólový stroj**, který dosahuje jednak dobrého poměru mezi momentem a hmotností a zároveň nedosahuje velkých ztrát v železe.

Výběr motoru:

Pro elektrickou tříkolku byly vybrány motory značky Siemens. Technické parametry jsou zobrazeny v tab. 7.1. V obou případech se jedná o asynchronní motory s kotvou nakrátko. **Pro jednoduchost budou veličiny týkající se motoru určeného do terénu označeny indexem jedna, do interiéru pak indexem dva.** Na obr. 7.3 je zobrazen jeden z nich (Siemens 1LA7 070).

Jestliže budou motory napájeny ze zdroje o síťovém kmitočtu $f_l = 50 \text{ Hz}$, pak v obou případech dosáhnou jmenovitých otáček o hodnotě $n_j = 1350 \text{ min}^{-1}$ a příslušných jmenovitých momentů (viz tab. 7.1), které tak spolu vytvářejí jmenovitý bod. Jmenovitý proud při napětí 400V činí u prvního motoru $I_{j1} = 0,76\text{A}$ a u druhého $I_{j2} = 0,42\text{A}$ [17].

Typ tříkolky	Model motoru	Jmen. výkon P_j [W]	Počet pólů	Účinnost stroje η [%]	Jmen. moment M_j [Nm]	Sít'ový kmitočet f_1 [Hz]	Hmotnost m [kg]
do terénu	Siemens 1LA7 070	250	4-pól	60	1,8	50	4,8
do interiéru	Siemens 1LA7 060	120	4-pól	55	0,85	50	3,5

Tab. 7.1: Technické parametry asynchronních motorů vhodných pro elektrickou tříkolku [17]

Určení nového jmenovitého bodu:

Pro případ, kdy vozidlo překonává maximální stoupání, požadujeme od motoru maximální moment, který lze využívat pouze krátkodobě (v opačném případě hrozí jeho přehřátí – motory jsou jistě tepelně zpožděnou ochranou proti přetížení). Říkáme, že motor je v tzv. přesyceném stavu. Z údajů uvedených výrobcem je pro oba motory poměrný záběrný moment roven $M_z / M_j = 1,9$. Záběrové momenty jsou tedy rovny:

$$M_{z1} = 1,9 \cdot M_{j1} \doteq 3,4 Nm \quad (7.1)$$

$$M_{z2} = 1,9 \cdot M_{j2} \doteq 1,6 Nm \quad (7.2)$$

Kde M_j je jmenovitý moment motoru

Z momentově - otáčkové charakteristiky na hnaném kole vozidla (obr. 4.4 a 4.5) je patrné, že pro rozjezd do maximálního stoupání je třeba vyvinout moment o hodnotě $52 Nm$ (v terénu) a $30,5 Nm$ (v interiéru). Musíme tak vytvořit převodový poměr mezi rotorem a osou hnaných kol:

$$z_1 = \frac{M_1}{M_{z1}} = \frac{52}{3,25} \doteq \underline{\underline{16}} \quad (7.3)$$

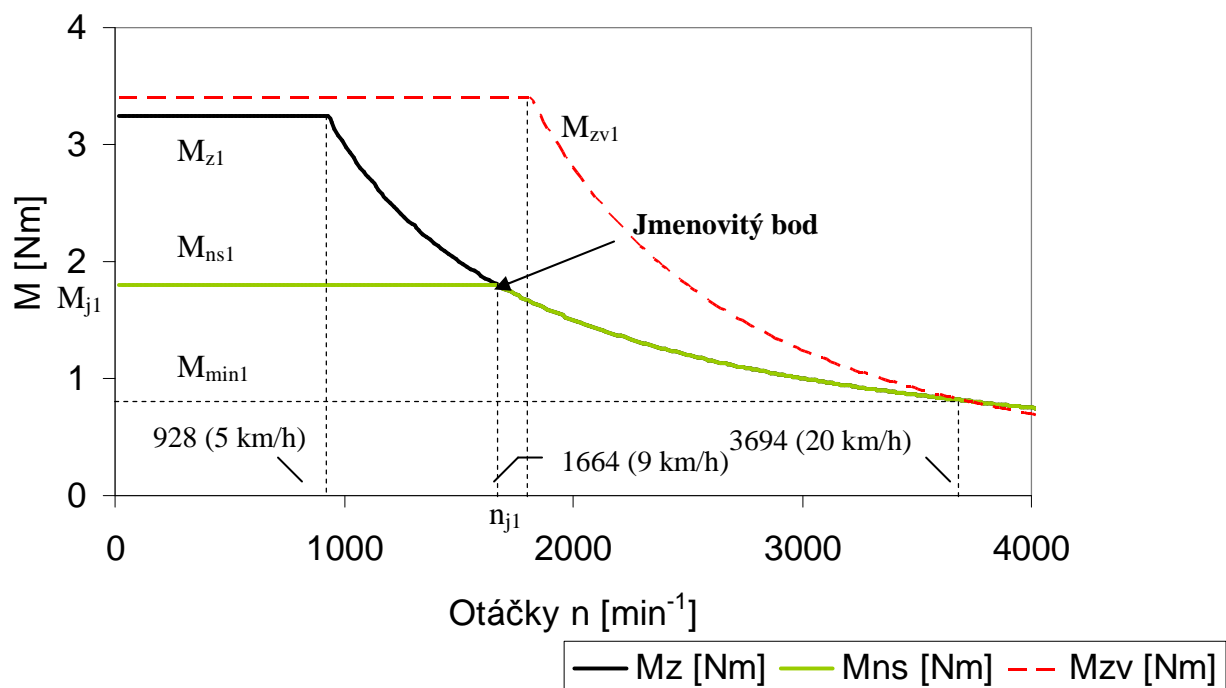
$$z_2 = \frac{M_2}{M_{z2}} = \frac{30,5}{1,6} \doteq \underline{\underline{19}} \quad (7.4)$$

Převodový poměr by měl být v celočíselném tvaru, a tak u motoru do terénu bude záběrový moment nepatrně menší. Při maximálních rychlostech dosahují hřídele motorů následujících maximálních otáček n_{max} :

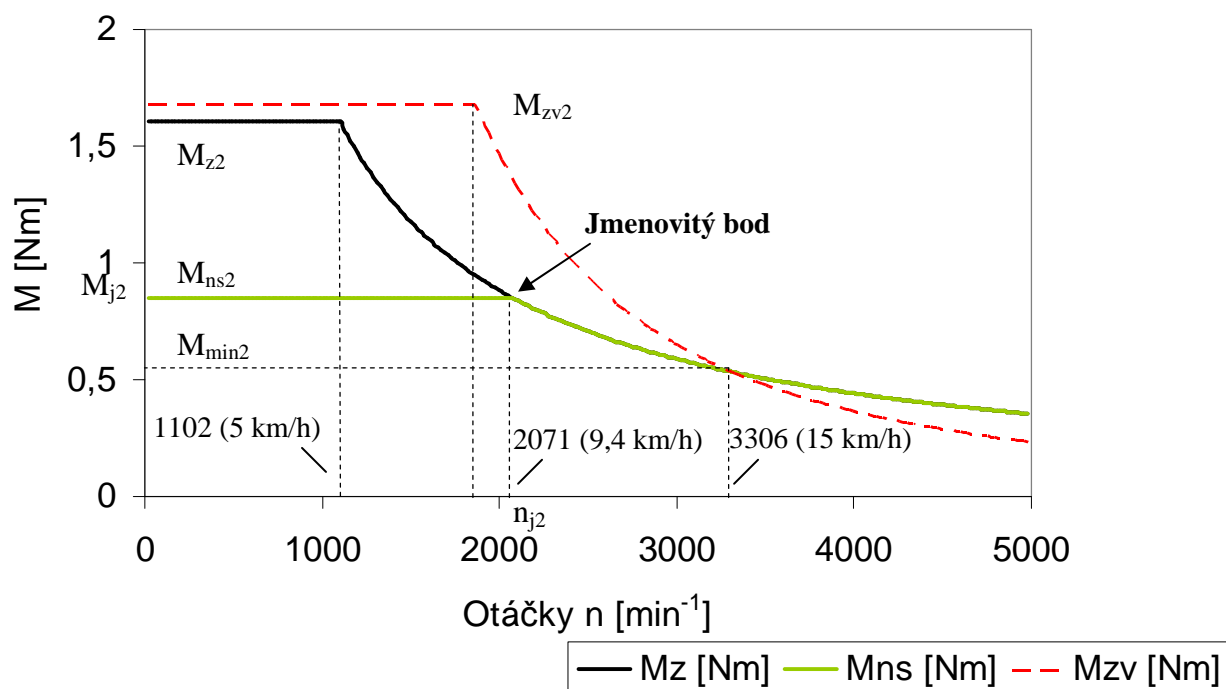
$$n_{max1} = z_1 n_{o1} = 16 \cdot 230,85 \doteq 3694 \text{ min}^{-1} \quad (7.5)$$

$$n_{max2} = z_2 n_{o2} = 19 \cdot 174 \doteq 3306 \text{ min}^{-1} \quad (7.6)$$

Kde n_o jsou maximální otáčky osy hnaných kol



Obr. 7.1: Vytvoření jmenovitého bodu pro motor Siemens 1LA7 070 (určený do terénu)



Obr. 7.2: Vytvoření jmenovitého bodu pro motor Siemens 1LA7 060 (určený do interiéru)

V technických informacích jsou pro oba motory uvedeny maximální přípustné otáčky do 4200 min^{-1} , tedy otáčky n_{max1} a n_{max2} jsou přijatelné.

Nyní můžeme přistoupit k vytvoření momentově – otáčkové charakteristiky pro motor s novým jmenovitým bodem. Výše uvedené obr. 7.1 a 7.2 zobrazují charakteristiku pro motor do terénu a interiéru.

V případě nízkých otáček, kdy je motor v přesyceném stavu, platí průběh momentu M_z označený černou čarou, který je ekvivalentní momentově - otáčkové charakteristice na hnaném kole (rozdíl je pouze v převodovém poměru). Průběh momentu M_{ns} označený zelenou čarou zobrazuje motor v nepřetíženém stavu.

Moment zvratu M_{zv} , označen červenou čarou (čárkovanou), je vypočten z poměrného momentu zvratu (uvedený výrobcem). Při nízkých otáčkách dosahuje konstantní hodnoty $M_{zv1} = 3,4 \text{ Nm}$ ($M_{zv2} = 1,7 \text{ Nm}$). Jakmile stroj dosáhne jmenovitých otáček, moment zvratu začne klesat, stejně jako moment M_{ns} (průběh má ovšem kvadratický charakter, a tak je pokles mnohem prudší).

Naším cílem je nalézt jmenovitý bod v takové pozici, aby moment zvratu byl roven M_{min} , tedy momentu, kterého je dosaženo v oblasti maximálních otáček n_{max} . Jmenovité otáčky n_{j1} a n_{j2} jsou vypočteny ze vztahu 7.7 a 7.8 [4]:

$$n_{j1} = \sqrt{\frac{M_{min1}}{M_{zv1}}} \cdot n_{max1} = \sqrt{\frac{0,82}{3,4}} \cdot 3694 \doteq \underline{1814 \text{ min}^{-1}} \quad (7.7)$$

$$n_{j2} = \sqrt{\frac{M_{min2}}{M_{zv2}}} \cdot n_{max2} = \sqrt{\frac{0,53}{1,7}} \cdot 3306 \doteq \underline{1846 \text{ min}^{-1}} \quad (7.8)$$

Výše vypočtené jmenovité otáčky byly pak pro zachování jmenovitých momentů upraveny do konečné podoby, jak je zobrazeno v tab. 7.2:

Model motoru	Původní M_j [Nm]	Nový M_j [Nm]	Původní n_j [min^{-1}]	Nové n_j [min^{-1}]	M_{min} [Nm]	n_{max} [min^{-1}]
1LA7 070 (terén)	1,8	1,8	1350	1664	0,82	3694
1LA7 060 (interiér)	0,85	0,85	1350	2071	0,53	3306

Tab. 7.2: Srovnání původních a nových jmenovitých bodů pro navrhované motory [17]

Nyní můžeme vypočítat jmenovitý výkon P_j v novém jmenovitém bodě:

$$P_{j1} = 2\pi n_{j1} M_{j1} = 2 \cdot \pi \cdot 27,7 \cdot 1,8 \doteq \underline{314 \text{ W}} \quad (7.9)$$

$$P_{j2} = 2\pi n_{j2} M_{j2} = 2 \cdot \pi \cdot 34,5 \cdot 0,85 \doteq \underline{184 \text{ W}} \quad (7.10)$$

Převinutí motorů:

Jelikož došlo k vytvoření nového jmenovitého bodu, tak je třeba provést převinutí motoru. Změnou jmenovitých otáček dojde ke změně původního kmitočtu napájecího napětí f_1 , který můžeme vypočítat ze vztahu 7.11 (vztahy převzaty z [11]):

$$f_1 = f_2 + pn_j \quad (7.11)$$

Kde f_2 je kmitočet indukovaného napětí rotorového vinutí

p je počet pólových dvojic

Kmitočet indukovaného napětí rotorového vinutí f_2 vypočteme jako:

$$f_2 = p(n_1 - n_j) = 2 \cdot (25 - 22,5) = 5 \text{ Hz} \quad (7.12)$$

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (7.13)$$

Kde n_1 jsou otáčky magnetického pole statoru

Při zachování hodnoty f_2 dosadíme do vztahu 7.11 nové hodnoty jmenovitých otáček a vypočteme nový kmitočet napájecího napětí pro motor do terénu a iteriéru:

$$f'_{1ter} = f_2 + pn_{j1} = 5 + 2 \cdot 27,7 \doteq \underline{60,5 \text{ Hz}} \quad (7.14)$$

$$f'_{1int} = f_2 + pn_{j2} = 5 + 2 \cdot 34,5 \doteq \underline{74 \text{ Hz}} \quad (7.15)$$

Podílem nového a původního kmitočtu (se započtením změny hladiny napětí U_d) dostaneme koeficient k , který nám říká, kolikrát musíme zmenšit počet závitů na vinutí statoru, abychom docílili stejného jmenovitého momentu.

Stejnoseměrné napětí meziobvodu bude $U_d = 24 \text{ V}$ (kap. 9.3.2). Výrobce uvádí parametry pro zapojení vinutí do hvězdy. Jestliže budeme uvažovat zapojení do trojúhelníku, tak se nám statorové napětí na vinutí motoru k – krát zmenší. Velikost efektivní hodnoty nového sdruženého napětí U_{sef} můžeme vyjádřit jako [4]:

$$U_{sef} = \frac{U_d}{\sqrt{2}} = \frac{24}{\sqrt{2}} \doteq \underline{17 \text{ V}} \quad (7.16)$$

$$k_1 = \frac{f'_{1ter}}{f_1} \cdot \frac{U_{sef}}{U_{sef}} = \frac{60,5}{50} \cdot \frac{230}{17} \doteq \underline{\underline{16,4}} \quad (7.17)$$

$$k_2 = \frac{f'_{1int}}{f_1} \cdot \frac{U_{sef}}{U_{sef}} = \frac{74}{50} \cdot \frac{230}{17} \doteq \underline{\underline{20}} \quad (7.18)$$

Kde U_{sef} je efektivní hodnota síťového napětí

Vlivem změny kmitočtu napájecího napětí se nám také k – krát zvýší amplituda proudu statorovým vinutím. Pro výpočet efektivní hodnoty fázového proudu před převinutím motoru můžeme užít vztah [4]:

$$I_{f_{ef1}} = \frac{P_{j1}}{3 \cdot U_{f_{ef}} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \eta_1} = \frac{250}{3 \cdot 230 \cdot 0,79 \cdot 0,6} \doteq \underline{0,76A} \quad (7.19)$$

$$I_{f_{ef2}} = \frac{P_{j2}}{3 \cdot U_{f_{ef}} \cdot \cos \varphi_2 \cdot \eta_2} = \frac{120}{3 \cdot 230 \cdot 0,75 \cdot 0,55} \doteq \underline{0,42A} \quad (7.20)$$

Kde $\cos \varphi$ je účinník

η je účinnost motoru

Po převinutí motoru budeme tedy požadovat efektivní hodnotu fázového proudu o velikosti [4]:

$$I_{f_{ef1}} = k_1 I_{f_{ef1}} = 16,4 \cdot 0,76 \doteq \underline{12,5A} \quad (7.21)$$

$$I_{f_{ef2}} = k_2 I_{f_{ef2}} = 20 \cdot 0,42 \doteq \underline{8,4A} \quad (7.22)$$

Pro zvýšení efektivní hodnoty je třeba zvýšit k – krát průřez vodičů vinutí. Ohmické ztráty ve vinutí zůstanou stejné, neboť se objem vinutí a proudová hustota nemění.

Vlivem převinutí motoru sice dojde k zvětšení ztrát v oblasti magnetické obvodu, ale zároveň docílíme zvýšení celkové účinnosti stroje. Nové jmenovité výkony jsou u obou navrhovaných motorů větší. Přesněji vzrostl u motoru do terénu na $P_{j1} = 314W$ a u motoru do interiéru na $P_{j2} = 184W$ (rovnice 7.9 a 7.10) [4].



Obr. 7.3: Asynchronní motor značky Siemens 1LA7 070 [17]

7.2 Návrh stejnosměrného motoru s permanentními magnety

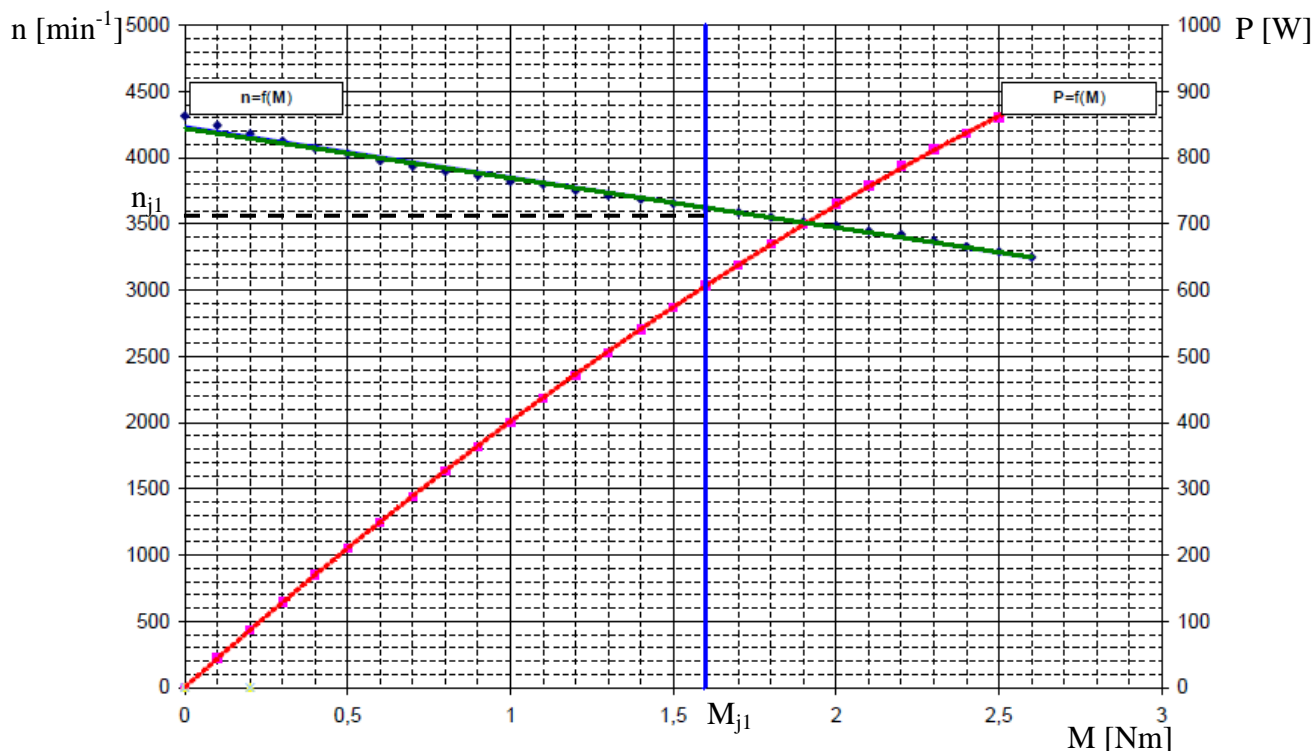
Výběr motoru:

Pro tříkolku do terénu i interiéru je zvolen motor značky Atas (obr. 7.6). Technické parametry motorů jsou zobrazeny v tab. 7.3.

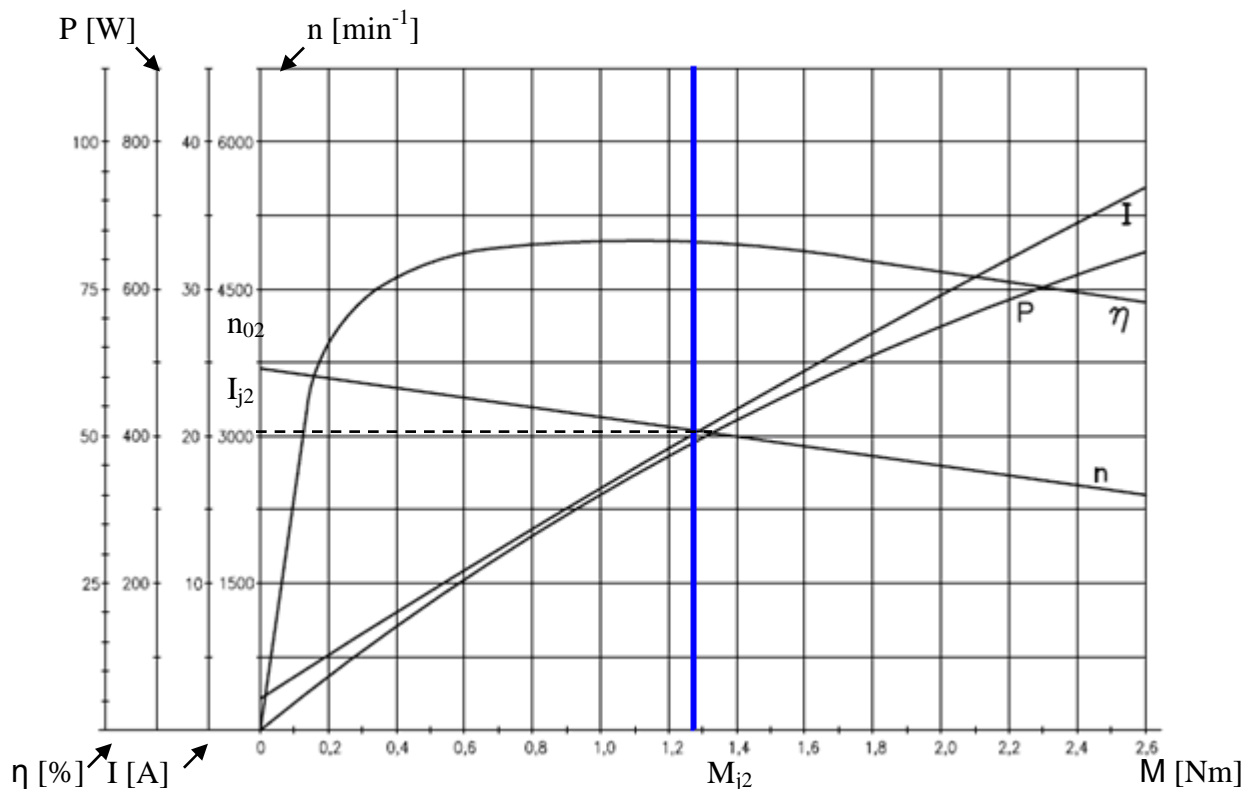
Typ tříkolky	Model motoru	Jmen. moment M_j [Nm]	Jmen. otáčky n_j [min^{-1}]	Napájecí napětí U_n [V]	Jmen. proud I_j [A]	Záběrný moment M_z [Nm]
do terénu	Atas P2XR492	1,6	3600	24	33	9,1
do interiéru	Atas P2XR508	1,3	2800	24	22	7,5

Tab. 7.3: Technické parametry stejnosměrných motorů s permanentními magnety [18]

Důležité technické údaje DC motoru lze vyčíst z tzv. zátěžové charakteristiky, které jsou zobrazeny na obr. 7.4 a 7.5.



Obr. 7.4: Zátěžová charakteristika DC motoru Atas P2XR492 - určený do terénu ([18] – upraveno autorem)



Obr. 7.5: Zátěžová charakteristika DC motoru Atas P2XR508 - určený do interiéru ([18] – upraveno autorem)

Rychlostní charakteristika nám udává závislost kroučícího momentu na otáčkách rotoru (při konstantním napětí). Důležitým parametrem motoru je záběrný moment M_z (maximální kroučící moment), kterého dosahuje motor při rozjezdu vozidla. Druhým koncovým bodem křivky jsou otáčky při chodu naprázdno n_0 . Modrá svislá čára nám zobrazuje na rychlostní charakteristice jmenovitý moment M_j , který motor dokáže zajistit v trvalém provozu při napájecím napětí 24V [20].

Proudová charakteristika nám udává závislost proudu na kroučícím momentu, jejíž koncové body můžeme označit jako I_0 (proud při chodu naprázdno) a I_z (záběrný proud). Změnou provozního proudu můžeme pak regulovat kroučící moment.

Křivka účinnosti nám znázorňuje vztah mezi mechanickým výkonem a elektrickým příkonem motoru. Naším cílem je stanovit jmenovitý bod do takové oblasti, abychom dosáhli maximální účinnosti [20].

Model motoru	Jmen. výkon P_j [W]	Účinnost stroje η [%]	Hmotnost m [kg]
Atas P2XR492	603	78,1	4,9
Atas P2XR508	381	83,3	4,9

Tab. 7.4: Jmenovité výkony a účinnosti stejnosměrných motorů [18]

Pomocí hodnot z tab. 7.3 jsme pak vypočetli jmenovité výkony P_j :

$$P_{j1} = 2\pi n_{j1} M_{j1} = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1,6 \doteq \underline{\underline{603W}} \quad (7.23)$$

$$P_{j2} = 2\pi n_{j2} M_{j2} = 2 \cdot \pi \cdot 46,7 \cdot 1,3 \doteq \underline{\underline{381W}} \quad (7.24)$$

Jmenovitý bod se v tomto případě u obou motorů nijak nemění. Pro splnění požadovaných parametrů nám stačilo vhodně navolit převodový poměr. Vycházíme opět z charakteristiky na hnaném kole vozidla (obr. 4.4 a 4.5). Podílem momentu na ose hnaných kol (pro rozjezd do maximálního stoupání) a maximálního momentu DC motoru M_{max} dostaneme potřebný převodový poměr:

$$w_1 = \frac{M_1}{M_{max1}} = \frac{52}{3,3} \doteq \underline{\underline{16}} \quad (7.25)$$

$$w_2 = \frac{M_2}{M_{max2}} = \frac{30,5}{1,7} \doteq \underline{\underline{18}} \quad (7.26)$$

Na obr. 7.6 je navrhnutá jednostupňová převodovka s převodovým poměrem $u = 16$ (od firmy Atas) [19], kterou můžeme použít u obou motorů. Mezi hřídelí převodovky a osou zadních kol bude použit řetězový převod. U tříkolky do interiéru je $w_2 = 18$. Dílčí převody se mezi sebou násobí, takže řetězový převod e bude mít převodový poměr:

$$w_2 = u \cdot e = 16 \cdot \frac{18}{16} = \underline{\underline{18}} \quad (7.27)$$

U tříkolky do terénu již další redukce otáček nebude potřeba. Dosazené maximální momenty M_{max1} a M_{max2} ve vztazích 7.25 a 7.26 jsou voleny tak, aby vozidlo s výsledným převodovým poměrem dosáhlo při rozjezdu přijatelné akcelerace a zároveň s jmenovitými otáčkami motoru dosáhlo přijatelné rychlosti.

Jelikož bude navrhnutý pulsní DC/DC měnič pracovat v režimu snižování napětí (kap. 9.3), tak v případě, kdy bude plně otevřen ($U_d = 24V$), bude motor dosahovat jmenovitých otáček, které budou zároveň maximální:



Obr. 7.6: Navrhnutá jednostupňová převodovka od firmy Atas [19]

$$n_{\max 1} = w_1 n_{o1} = 16 \cdot 225 \doteq \underline{3600 \text{ min}^{-1}} \quad (7.28)$$

$$n_{\max 2} = w_2 n_{o2} = 18 \cdot 155 \doteq \underline{2800 \text{ min}^{-1}} \quad (7.29)$$

Kde n_{\max} jsou maximální (jmenovité) otáčky hřídele motoru

Ze vztahů 7.28 a 7.29 lze vyčíst maximální otáčky osy hnaných kol n_o , z kterých můžeme vypočítat maximální rychlost vozidla v_{\max} :

$$v_{\max 1} = \frac{n_{o1} \cdot o}{60} \cdot 3,6 = \frac{225 \cdot 1,44}{60} \cdot 3,6 \doteq \underline{\underline{19,4 \text{ km/h}}} \quad (7.30)$$

$$v_{\max 2} = \frac{n_{o2} \cdot o}{60} \cdot 3,6 = \frac{155 \cdot 1,44}{60} \cdot 3,6 \doteq \underline{\underline{13,4 \text{ km/h}}} \quad (7.31)$$



Obr. 7.7: Stejnsměrný motor značky Atlas P2XR508 [18]

7.3 Výběr vhodné varianty

Byl proveden návrh a vytipování asynchronního motoru s kotvou nakrátko a stejnosměrného motoru s permanentními magnety.

Asynchronní motor je cenově přijatelnější a ve vysokých otáčkách je ho možné odbudit. Má ovšem nižší účinnost a také návrh řízení by byl mnohem komplikovanější. Nevýhodou je nutnost použití DC/AC střídače, který je technicky i cenově náročnější než DC/DC měnič. Pro náš návrh by bylo také zapotřebí provést převinutí motoru.

Výhodou stejnosměrného motoru s permanentními magnety je vyšší účinnost a levnější DC/DC měnič. Jedinou překážkou se zdá být údržba komutátoru a kartáčů. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.3, životnost kartáčů je odhadována zhruba na 4000 pracovních hodin (motor bude sloužit cca necelých 6 let). Pro splnění požadavku nízké ceny, jednoduchosti řízení a s přihlédnutím na provozní nároky bude tedy nejvhodnější použít pro oba typy tříkolek **stejnsměrný motor s permanentními magnety**.

8. Návrh akumulátoru pro elektrickou tříkolku

Před volbu akumulátoru musíme nejprve vypočítat potřebnou kapacitu akumulátoru (do terénu a interiéru), pak srovnat výhody a nevýhody vhodných zdrojů elektrické energie a nakonec provést konkrétní vytipování akumulátorů (při výběru potom také bude hrát roli pořizovací cena).

8.1 Postup výpočtu kapacity akumulátoru

Pro výpočet potřebné kapacity akumulátoru nejdříve odvodíme obecný vzorec. Vycházíme ze vztahu pro výpočet energie akumulátoru E_a (vztahy převzaty z [22]):

$$E_a = P_a \cdot t_a \quad (8.1)$$

Kde P_a je výkon akumulátoru

t_a je doba, po kterou je schopen akumulátor dodávat energii o výkonu P_a

$$P_a = U_a \cdot I_a \quad (8.2)$$

$$t_a = \frac{C_a \cdot 3600}{I_a} \quad (8.3)$$

Kde U_a je napětí na svorkách akumulátoru

I_a je proud protékající akumulátorem

C_a je kapacita akumulátoru

Kapacita C_a se udává v *ampér-hodinách*, a proto musíme ve vztahu 8.3 převést t_a na základní jednotku. Podílem energie akumulátoru E_a a průměrným příkonem motoru P_1 dostaneme dobu t_a , která nám vyjadřuje provozní čas akumulátoru, po který bude schopen dodávat energii.

$$t_a = \frac{E_a}{P_1} \quad (8.4)$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \cdot 100 \quad (8.5)$$

Kde P_2 je průměrný výkon motoru

Jestliže známe dobu t_a , pak s průměrnou rychlostí v_p vypočteme teoreticky dojezd d elektrické tříkolky:

$$d = t_a \cdot v_p \quad (8.5)$$

Z výše uvedených vztahů tedy můžeme vyjádřit obecnou rovnici pro výpočet kapacity akumulátoru C_a :

$$C_a = \frac{P_2 \cdot d}{36 \cdot U_a \cdot v_p \cdot \eta} \quad (8.6)$$

Výpočtem dostaneme pouze přibližnou hodnotu kapacity a slouží nám spíše jako odhad. V praxi je průběh vybíjení velmi komplikovaným jevem. Patrné množství energie se spotřebuje, zvláště u vozidla do interiéru, při častém rozjíždění. Zahrnout tento jev do výpočtu není nijak jednoduché, neboť počet rozjezdů bude u jednotlivých uživatelů vždy různý a je komplikované zavádět nějaký obecný počet. Možným řešením problému je započtení dostatečné rezervy k výslednému odhadu kapacity.

Pro zjednodušení budeme brát v úvahu dva případy vybíjení:

- Vybíjení při plynulé jízdě po vodorovné ploše
- Vybíjení při plynulé jízdě do kopce

Kapacita akumulátoru do terénu:

Bereme v úvahu fakt, že osoba bude používat vozidlo prakticky denně. Kapacita by tedy měla vystačit k jízdě minimálně na jeden den.

Elektrická tříkolka určená do terénu by měla být zkonstruována na delší trasy. Abychom se co možná nejvíce přiblížili skutečnosti, budeme předpokládat, že z celkové cesty činí cca 70% vybíjení při plynulé jízdě po rovině a cca 30% je vybíjení při plynulé jízdě do kopce (o průměrném sklonu stoupání). Při klesání není vybíjení tak značné. Pokud pomineme možnost samonabíjení akumulátoru (generátorický režim), tak je energie spotřebována jen v rámci elektromagnetického brzdění.

Průměrný výkon P_{r1} pro jízdu po rovině a P_{k1} pro jízdu do kopce jsou rovny:

$$P_{r1} = (F_t + F_v) v_{p1} = (7,5 + 4,7) \cdot 3,3 \doteq \underline{40,3W} \quad (8.7)$$

Kde v_{p1} je průměrná rychlost po rovině (cca 12km/h)

$$P_{k1} = (F_T + F_t + F_v) v_{p2} = (112,8 + 7,5 + 1,6) \cdot 1,94 \doteq \underline{236,5W} \quad (8.8)$$

Kde v_{p2} je průměrná rychlost do kopce (cca 7km/h)

$$F_T = F_G \cdot \sin \beta_{p1} = 1079,1 \cdot \sin 6^\circ \doteq 112,8N \quad (8.9)$$

Kde β_{p1} je průměrný sklon stoupání v terénu

S využitím obecné rovnice 8.6 můžeme nyní vypočítat požadovanou kapacitu C_a . Předpokládaný dojezd byl zvolen $d_1 = 30\text{km}$. Napájecí napětí motoru určeného do terénu je 24V , které získáme sériovým zapojením dvou akumulátorů o svorkovém napětí 12V . Do vzorce 8.10 tedy dosazujeme za $U_a = 24\text{V}$ (séριοvé zapojení).

$$C_a = 0,7 \cdot C_{a1} + 0,3 \cdot C_{a2} = 0,7 \cdot \frac{P_{r1} \cdot d_1}{36 \cdot U_a \cdot v_{p1} \cdot \eta_1} + 0,3 \cdot \frac{P_{k1} \cdot d_1}{36 \cdot U_a \cdot v_{p2} \cdot \eta_1} =$$

$$= 0,7 \cdot \frac{40,3 \cdot 30000}{36 \cdot 24 \cdot 3,3 \cdot 78,1} + 0,3 \cdot \frac{236,5 \cdot 30000}{36 \cdot 24 \cdot 1,94 \cdot 78,1} \doteq \underline{\underline{20\text{Ah}}} \quad (8.10)$$

Kde C_{a1} je kapacita potřebná pro plynulou jízdu po rovině

C_{a2} je kapacita potřebná pro plynulou jízdu do kopce

d_1 je předpokládaný dojezd tříkolky do terénu

η_1 je účinnost navrženého motoru (Atas P2XR492)

Oba akumulátory pro elektrickou tříkolku do terénu by měly dosahovat kapacity minimálně cca 20Ah .

Kapacita akumulátoru do interiéru:

Opět bereme v úvahu, že uživatel bude vozidlo využívat každý den. Elektrická tříkolka do interiéru je určená především pro užívání v obytných místnostech a v areálech, kde se předpokládají nižší nároky na sklon stoupání a celkový dojezd. Kapacitu tedy budeme počítat stejným způsobem jako v předázejícím případě (snížíme pouze úhel stoupání a požadovaný dojezd).

Průměrný výkon P_{r2} pro jízdu po rovině a P_{k2} pro jízdu do kopce jsou rovny:

$$P_{r2} = (F_t + F_v) v_{p1} = (7,5 + 4,7) \cdot 3,3 \doteq \underline{\underline{40,3\text{W}}} \quad (8.11)$$

Kde v_{p1} je průměrná rychlost po rovině (cca 12km/h)

$$P_{k2} = (F_T + F_t + F_v) v_{p2} = (56,5 + 7,5 + 1,6) \cdot 1,94 \doteq \underline{\underline{127,3\text{W}}} \quad (8.12)$$

Kde v_{p2} je průměrná rychlost do kopce (cca 7km/h)

$$F_T = F_G \cdot \sin \beta_{p2} = 1079,1 \cdot \sin 3^\circ \doteq 56,5\text{N} \quad (8.13)$$

Kde β_{p2} je průměrný sklon stoupání v interiéru

Nyní můžeme vypočítat požadovanou kapacitu C_a . Předpokládaný dojezd byl zvolen $d_2 = 20\text{km}$. Napájecí napětí motoru určeného do interiéru je 24V , které získáme opět sériovým zapojením dvou akumulátorů o svorkovém napětí 12V .

$$C_a = 0,7 \cdot C_{a1} + 0,3 \cdot C_{a2} = 0,7 \cdot \frac{P_{r2} \cdot d_2}{36 \cdot U_a \cdot v_{p1} \cdot \eta_2} + 0,3 \cdot \frac{P_{k2} \cdot d_2}{36 \cdot U_a \cdot v_{p2} \cdot \eta_2} =$$

$$= 0,7 \cdot \frac{40,3 \cdot 20000}{36 \cdot 24 \cdot 3,3 \cdot 83,3} + 0,3 \cdot \frac{127,3 \cdot 20000}{36 \cdot 24 \cdot 1,94 \cdot 83,3} \doteq \underline{\underline{7,8\text{Ah}}} \quad (8.14)$$

d_2 je předpokládaný dojezd tříkolky do interiéru

η_2 je účinnost navrženého motoru (Atas P2XR508)

Akumulátor pro elektrickou tříkolku do interiéru by měl dosahovat minimálně kapacity cca 12Ah . Navržená kapacita je záměrně zvolena vyšší než výsledný odhad z důvodu již zmiňované rezervy (pro spotřebu energie při rozjezdech). Požadované parametry pro návrhy akumulátorů jsou zobrazeny v tab. 8.1.

Typ tříkolky	Kapacita akumul. [Ah]	Požad. dojezd [km]	Svorkové napětí [V]	Počet [ks]
do terénu	25	30	24	2 (sériové zapojení)
do interiéru	12	20	24	2 (sériové zapojení)

Tab. 8.1: Požadované parametry pro návrhy akumulátorů

8.2 Vhodné zdroje elektrické energie

Vhodné zdroje elektrické energie pro tříkolku můžeme rozdělit do dvou kategorií:

- Olověné akumulátory
- Li-Ion akumulátory

8.2.1 Olověné akumulátory

Předností trakčních akumulátorů, v porovnání s klasickými autobateriemi, je schopnost dosáhnout častého a hlubokého vybíjení. Používají se jako zdroj energie pro pohon elektrických dopravních prostředků. Informace byly čerpány z literatury [21]. Mezi nejčastěji používané patří:

- **Zaplavené trakční akumulátory** – elektrolyt je zde jako volně nalitá kapalina mezi elektrodami
 - Bezúdržbové trakční akumulátory - (olověné kyselinové akumulátory s deskami legovanými kalciumem nebo stříbrem, u kterých není zapotřebí dolévání destilovanou vodou)
 - Nízkoúdržbové trakční akumulátory - (olověné kyselinové akumulátory s deskami legovanými kalciumem nebo antimonem, u kterých můžeme sledovat stav hladiny elektrolytu a případně doplnit destilovanou vodu)
- **Akumulátory VRLA (Valve Regulated Lead Acid)** – olověné akumulátory, které jsou konstruovány s regulací vnitřního tlaku pomocí ventilů.
 - Akumulátory typu AGM (Absorbed Glass Mat batteries) - elektrolyt je nasáknut do skelné vaty, která se nachází mezi elektrodami
 - Gelové akumulátory - elektrolyt akumulátorů je zahuštěn ve formě gelu (obr. 8.1)

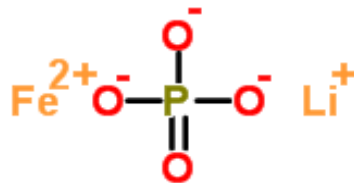


Obr. 8.1: Ukázka gelového trakčního akumulátoru (převzato z [21])

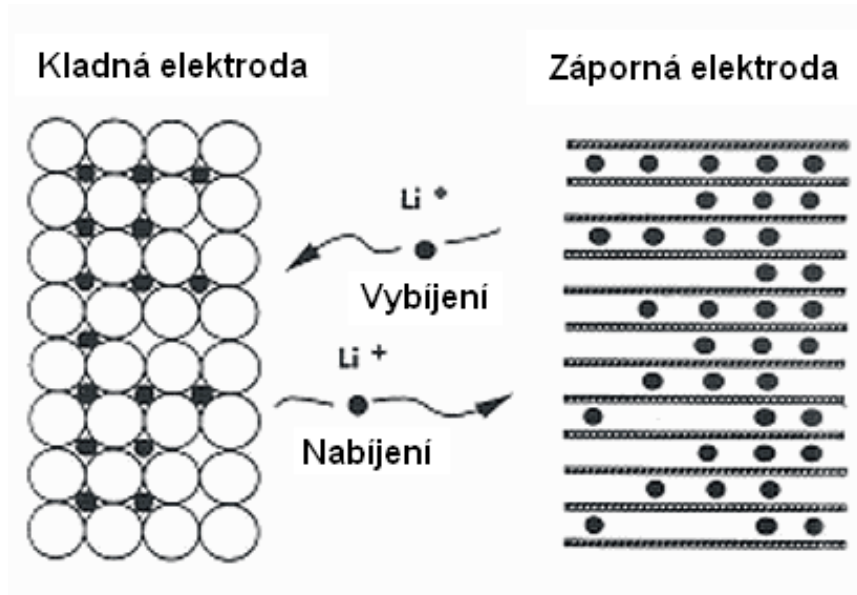
8.2.2 Li-Ion akumulátory

Li-Ion akumulátory obsahují alkalický nebo jiný nekyslý elektrolyt. označení „Ion“ je odvozen podle iontů Li^+ , které putují během nabíjení z kladné elektrody na zápornou a při vybíjení putují zpět (obr. 8.3). Zápornou elektrodu tvoří směs grafitu obohaceného lithiem a polyolefinů. Kladná elektroda je nejčastěji vyráběna z následujících sloučenin [22]:

- LiCoO_2
- LiFePO_4
- LiNiO_2
- LiV_2O_5
- $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$



Obr. 8.2: Sloučenina LiFePO_4 [22]



Obr. 8.3: Princip nabíjení a vybíjení Li-Ionového akumulátoru ([22] - upraveno autorem)

Lithium-železo-fosfátový akumulátor:

Kladná elektroda je vyrobena ze sloučeniny LiFePO_4 , která neobsahuje ušlechtilé prvky (jako např. kobalt) a má tak dostupnější suroviny. Elektrolyt je nejčastěji používán LiPF_6 , který je rozpuštěný v nepolárním rozpouštědle.

Nominální napětí článku je 3,3V. Vybíjecí charakteristika akumulátoru značky A123 systems je zachycena na obr. 8.4. Články lze mezi sebou zapojovat paralelně i sériově, a tak docílíme potřebného napětí. Hlavní výhodou je oproti běžným lithiovým bateriím schopnost dodat vysoký proud [22] (podrobnější srovnání zachycuje tab. 8.2).

Dalšími důvody, proč zvolit právě akumulátor LiFePO_4 před ostatními typy Li-Ion akumulátorů, jsou [22]:

Výhody:

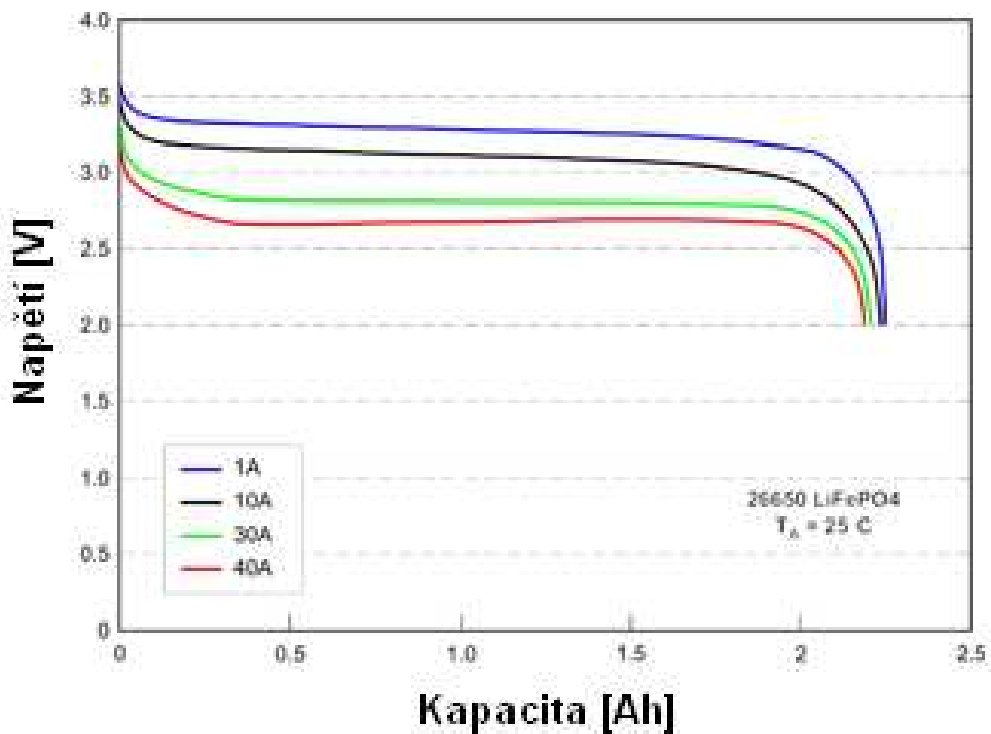
- Mají vyšší tepelnou a chemickou stabilitu (tzn. lepší vlastnosti z hlediska bezpečnosti)
- Dosahují delší životnosti (2000 cyklů, cca 10 let)
- Při použití fosforečnanů se sníží náklady na výrobu a jsou také z hlediska životního prostředí bezpečnější

Nevýhody:

- Dosahují nižší kapacity (až o 25%)
- U nových typů bylo zaznamenáno předčasné selhání (v případě kdy jsou vybíjeny pod úroveň 33%)

Typ akumulátoru	LiFePO_4	LiCoO_2	LiMn_2O_4	$\text{Li}(\text{NiCo})\text{O}_2$
Obecná bezpečnost	nejbezpečnější	není stabilní	přijatelné	není stabilní
Bezpečnost pro životní prostředí	přijatelné	velmi nebezpečné	velmi nebezpečné	velmi nebezpečné
Životnost	nejlepší / výborné	přijatelné	přijatelné	přijatelné
Výkon / hmotnost	přijatelné	dobré	přijatelné	nejlepší
Náklady	výborné	vysoké	přijatelné	vysoké
Teplotní rozsah	-20°C až +70°C	-20°C až +55°C	-20°C až +55°C	-20°C až +55°C

Tab. 8.2: Srovnání vlastností jednotlivých typů Li-Ion akumulátorů ([23] – upraveno autorem)



Obr. 8.4: Vybíjecí charakteristika akumulátoru A123 systems (26650) při 25 °C ([24] – upraveno autorem)

8.2.3 Porovnání výhod a nevýhod typů akumulátorů

Z výše uvedených typů akumulátorů se pro náš návrh zdají být nejvhodnější:

- Zaplavený trakční akumulátor
- Akumulátor VRLA (typu AGM nebo gelový akumulátor)
- Lithium-železo-fosfátový akumulátor

Zaplavený trakční akumulátor [21]:

Výhody:

- vysoká cyklická odolnost
- odolnost vůči hlubokému vybíjení
- můžeme je bezpečně nabíjet jakoukoliv nabíječkou

Nevýhody:

- nízkoúdržbové zaplavené akumulátory je třeba pravidelně doplňovat destilovanou vodou
- akumulátor není ideální provozovat při běžné pokojové teplotě
- obsahuje nebezpečnou sloučeninu (kyselinu sírovou H_2SO_4), která představuje riziko jak pro zdraví uživatele, tak pro životní prostředí
- Akumulátor obsahuje otvory pro odvětrávání hromadících se plynů, a tak ho nelze nenaklánět o více jak 50° . V případě překlopení by došlo přes otvory k úniku kyseliny sírové a tedy k jeho nevratnému poškození

Akumulátor VRLA (typu AGM nebo gelový akumulátor) [21]:

Výhody:

- v porovnání se zaplavenými akumulátory jsou výkonnější (mezi nejvýkonnější typy se řadí gelové akumulátory)
- díky uzavřenému ventilovému systému dochází k minimálnímu úniku plynů vně akumulátoru, a tak může být používán i v obytných místnostech (může být také zapojen v jakékoliv poloze)
- nevyžaduje kontrolu stavu hladiny elektrolytu (akumulátor je uzavřen)
- akumulátor je nerozlítelný, a proto nemůže dojít k úniku žádných nebezpečných kapalných sloučenin
- doba uskladnění dosahuje až jednoho roku (bez nutnosti dobíjení)
- lépe odolává náročnějšímu prostředí (jako je např. vlhkost nebo prašnost)
- gelové akumulátory dosahují nejdelší životnosti
- AGM akumulátory dosahují nižšího vnitřního elektrického odporu, a tak je můžeme více zatěžovat vyššími vybíjecími proudy

Nevýhody:

- AGM a gelové akumulátory jsou choulostivé na přebíjení
- je u nich doporučováno používání elektronicky řízených nabíječek

Lithium-železo-fosfátový akumulátor [22]:**Výhody:**

- dosahují delší životnosti (2000 cyklů, cca 10 let)
- lepší vlastnosti z hlediska bezpečnosti
- mají vyšší tepelnou a chemickou stabilitu

Nevýhody:

- vysoká pořizovací cena
- dosahují nižší kapacity (v porovnání s jinými druhy Li-Ion akumulátorů)

8.3 Vytipování vhodného akumulátoru

Z olověných akumulátorů se zdá být nejvhodnější variantou použití VRLA akumulátorů (gelový typ nebo AGM). Jejich velkou výhodou je v porovnání se zaplavenými akumulátory dlouhá životnost a vyšší výkonnost. Velkou předností je také fakt, že nevyžadují kontrolu stavu hladiny elektrolytu. Pořizovací cena je poměrně přijatelná.

Snad jedinou nevýhodou je choulostivost na přebíjení, která lze však kontrolovat automatickou nabíječkou.

Druhým typem, který by byl pro náš návrh přijatelný je LiFePO_4 akumulátor (obr. 8.5), který se na komerčním trhu objevil až v nedávné době. Jeho hlavní předností je vysoká životnost, která je ve srovnání s VRLA akumulátory až několiknásobná. Parametry konkrétních akumulátorů, které byly vytipovány z dostupných zdrojů, jsou zobrazeny v tab. 8.3.

Typ akumul.	Výrobce	Sériové číslo	Kapacita [Ah]	Svorkové napětí [V]	Cena [kč]	Hmotnost [kg]
VRLA (gel)	YUCELL	PG26-12	26	12	1410	8,1
VRLA (AGM)	CSB	EVX122 60	26	12	1848	9,3
VRLA (AGM)	YUCELL	PR12-12	12	12	523	3,7
Li-Ion (LiFePO_4)	A123 Systems	-	2,3	3,3	280	0,07

Tab. 8.3: Parametry vytipovaných akumulátorů vhodných pro elektrickou tříkolku [25], [24]



Obr. 8.5: Akumulátor LiFePO₄ od firmy A123 Systems [24]

Nejlepších vlastností dosahuje lithium-železo-fosfátový akumulátor. Velkou nevýhodou je ovšem pořizovací cena, která je také u jiných druhů Li-Ion obdobná. Pro dosažení potřebného napětí a kapacity musíme provést sériové a paralelní propojení četného počtu článků. Celkové finanční náklady pak několikanásobně převyšují náklady pro pořízení VRLA akumulátorů.

Nejvhodnějším typem **pro tříkolku do terénu je tedy gelový akumulátor YUCELL PG26-12** (obr. 8.6). V porovnání s typem AGM dosahuje vyšší výkonnosti a také pořizovací cena je přijatelnější (tab. 8.3). **Pro tříkolku do interiéru byl pak zvolen AGM akumulátor YUCELL PR12-12** [25]. Maximální vybíjecí proud je u prvního akumulátoru $I_{v1} = 78A$ a u druhého $I_{v2} = 150A$, což je pro naše účely dostačující (viz kap. 9.3.2).



Obr. 8.6: VRLA gelový akumulátor YUCELL PG26-12 [25]

9. Návrh měniče pro elektrickou tříkolku

Měnič můžeme definovat jako zařízení sloužící k přeměně elektrické energie, který se skládá z vlastního silového obvodu a řídicí elektroniky – regulačních obvodů. Hlavním požadavkem je především vysoká energetická účinnost, která by se teoreticky měla rovnat jedné a v praxi by se měla tomuto číslu co nejvíce přiblížit. Topologické schéma měniče pak může z pasivních prvků obsahovat jen cívky, kondenzátory a transformátory. Pro přímou regulaci výkonu nesmí být použit rezistor (jako hlavní regulační prvek) [26].

Rozdělení měničů provádíme na základě dvou modifikací elektrické energie – stejnosměrné a střídavé. Tímto je můžeme rozdělit do čtyř základních kategorií [26]:

- stř/ss (AC/DC)
- stř/stř (AC/AC)
- ss/ss (DC/DC)
- ss/stř (DC/AC)

V kap. 7 jsme pro oba typy elektrických tříkolek navrhli stejnosměrný motor s permanentními magnety. Jelikož bude motor napájen ze zdroje stejnosměrného napětí, tak se zaměříme **na pulsní měniče DC/DC**.

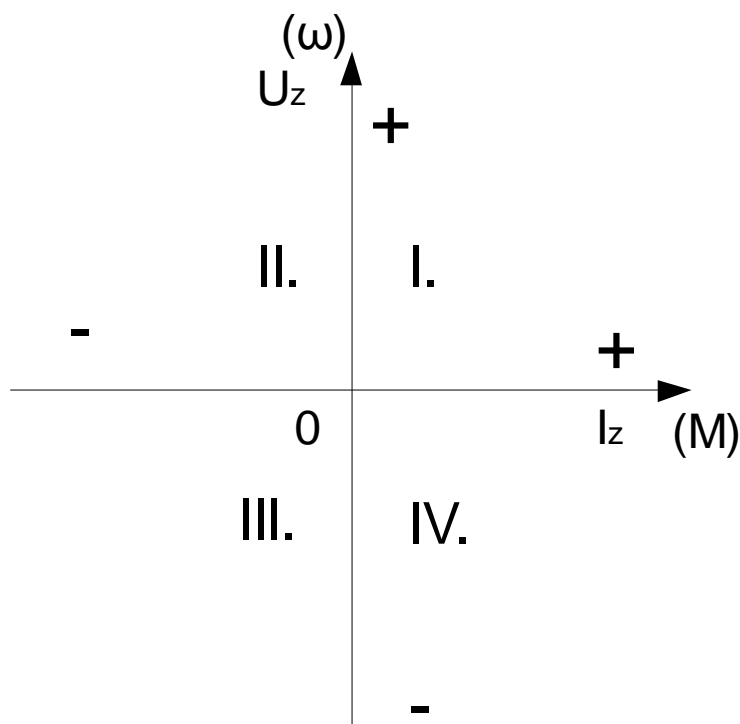
9.1 Pulsní měniče DC/DC (bez transformátoru)

DC/DC měniče můžeme definovat jako obvody sloužící k regulaci elektrické energie, které přeměňují vstupní stejnosměrné napětí U_1 na jiné vstupní stejnosměrné napětí U_2 . Jedná se o měniče napět'ového typu s napět'ovým meziobvodem. Měniče proudového typu, které jsou napájeny ze zdroje konstantního proudu, jsou v praxi podstatně méně využívány, a proto se jimi nebudeme podrobně zabývat.

Stejnosemřné měniče pracují v režimu pulsní šířkové modulace PWM, jejichž nosný kmitočet je u pohonů v rozmezí 2 až 20 kHz. U pulsních stabilizátorů stejnosměrného napětí menších výkonů je až 200 kHz (informace čerpány z literatury [27]).

9.2 Rozdělení pulsních měničů na základě pracovních kvadrantů

Jestliže stejnosměrný pulsní měnič zatížíme stejnosměrným motorem, potom motor můžeme nalézt ve formě aktivní zátěže ve čtyřech stavech, které odpovídají čtyřem různým kvadrantům VA – roviny. Toto rozdělení je zobrazeno na obr. 9.1 [27].

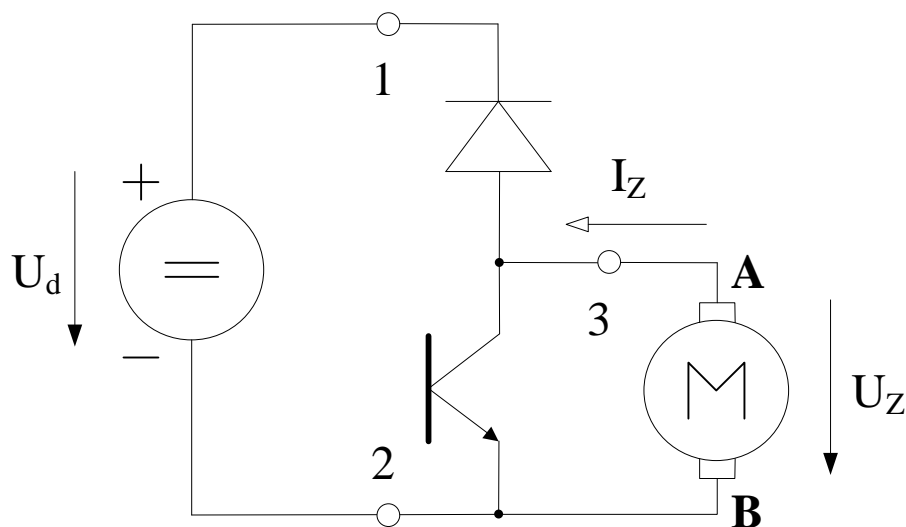


Obr. 9.1: Jednotlivé kvadranty VA – roviny pro různé režimy zátěže (informace čerpány z [27])

Motor nám pak pracuje ve dvou základních režimech:

- Motorický režim – oblast I. a III. kvadrantu
- Generátorický (brzdný) režim – oblast II. a IV. kvadrantu

Motorický režim vzniká tehdy, jestliže má proud I_z (vstupní proud do motoru) vzhledem k svorkovému napětí motoru U_z směr odpovídající spotřebiči (obr. 9.3). Jestliže má proud vzhledem k napětí směr odpovídající zdroji, potom se jedná o generátorický režim (obr. 9.2). Na uvedených schématech jsou svorky motoru označeny písmeny A a B . V motorickém režimu je ze zdroje U_d čerpána elektrická energie přes pulsní měnič do motoru. V případě generátorického režimu je mechanická energie zátěže ve stroji přeměněna na elektrickou energii, která je přes pulsní měnič čerpána opět do zdroje U_d [27].



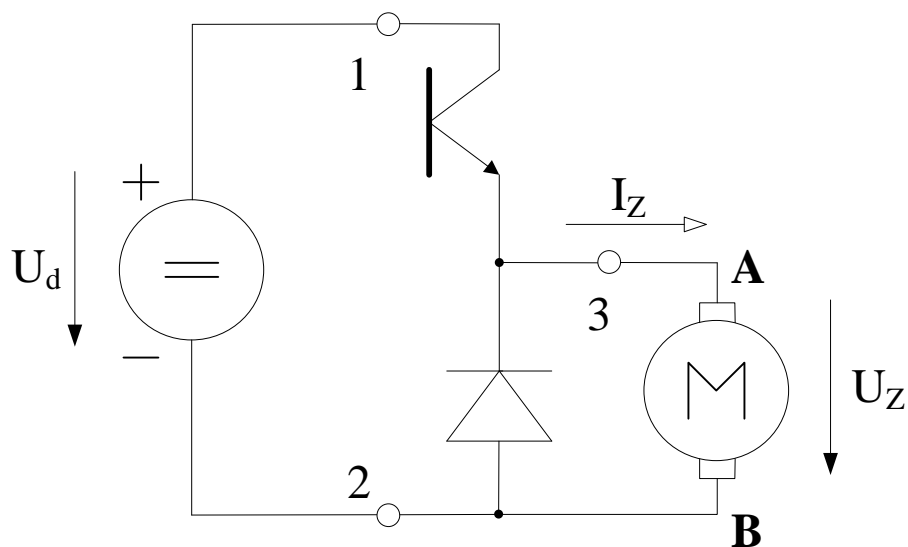
Obr. 9.2: Zapojení dolního spínače – měnič pracující v II. kvadrantu (informace čerpány z [27])

Se zvyšujícím se indukovaným napětím stroje U_i (přibližně rovno napětí U_Z) a proudem I_Z roste také úhlová rychlost hřídele motoru ω a zatěžovací moment M . Na základě této skutečnosti pak můžeme přiřadit rovinu $\omega - M$ k rovině $U_Z - I_Z$ a mít tak informace o průběhu mechanických veličin pohonu.

Klíčovou součástí všech pulsních měničů je *spínač*, který se skládá z nulové diody a vlastního spínacího tranzistoru (zapojení spínače je třeba vnímat jako trojpól 1-2-3). Zapojení lze nejlépe chápat z obr. 9.3 a 9.2, které zobrazují zapojení horního a dolního spínače. Přívlástek horní a dolní vyjadřuje u spínače polohu jeho tranzistoru. Tato zapojení jsou ukázkou nejjednoduššího jednokvadrantového pulsního měniče a na jejich základě je pak možno sestavit všechny typy. Nyní si můžeme uvést ty nejpoužívanější. Informace byly čerpány z literatury [27].

9.2.1 Pulsní měnič pracující v prvním kvadrantu (STEP-DOWN)

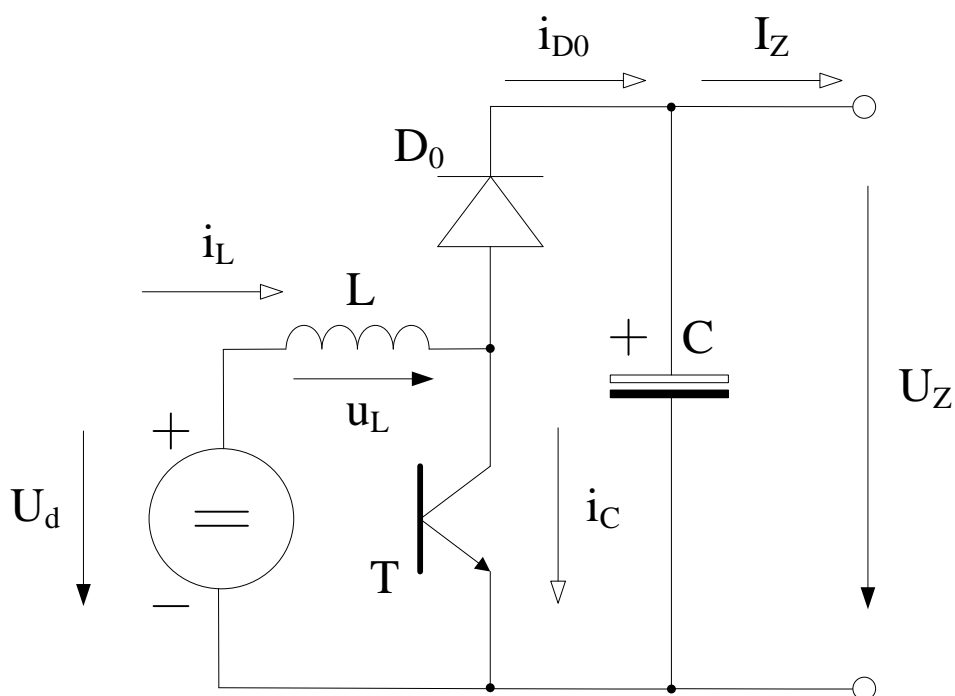
Jednokvadrantový pulsní měnič pracující v prvním kvadrantu, nazývaný také „Chopper“, je zobrazen na obr. 9.3, jehož zátěží je stejnosměrný motor. Měnič produkuje na výstupních svorkách impulsní napětí u_z , kde střední hodnota je U_Z a vychází z něj zvlněný proud i_z o střední hodnotě I_Z [27].



Obr. 9.3: Zapojení horního spínače – měnič pracující v I. kvadrantu - STEP-DOWN (informace čerpány z [27])

9.2.2 Pulsní měnič zvyšující napětí (STEP-UP)

Pulsní měnič zvyšující napětí, nazýván také jako „*boost converter*“, pracuje ve druhém kvadrantu a je ekvivalentní měniči STEP-DOWN pracující v prvním kvadrantu. Rozdíl je pouze v záměně zdroje a zátěže, takže měnič pracuje v generátorickém režimu. Schéma je uvedeno na obr. 9.4.



Obr. 9.4: Zapojení měniče STEP-UP (informace čerpány z [27])

V době zapnutí tranzistoru T je energie čerpána ze zdroje U_d a zároveň akumulována v tlumivce L . Během doby, kdy je tranzistor vypnut je energie tlumivky předávána přes diodu D_0 do kondenzátoru C . Měnič STEP-UP je schopen pracovat jen v režimu zvyšování napětí [27]:

$$U_z \geq U_d \quad (9.1)$$

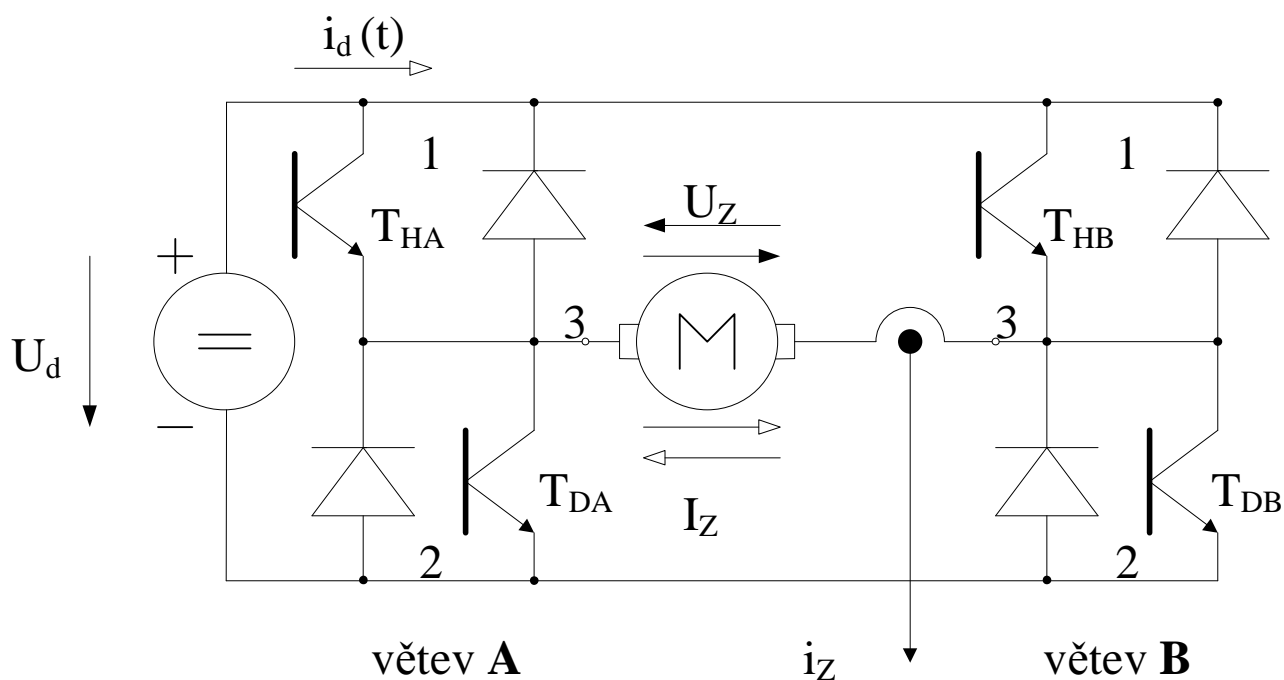
Kde U_z je svorkové napětí motoru

U_d je vstupní napětí zdroje

9.3 Návrh pulsního měniče

Pro návrh pulsního měniče nejprve provedeme jeho proudové a napěťové dimenzování, vypočteme jeho výkon, vypočteme ztráty výkonového obvodu, navrhne typ a počet kondenzátorů pro silovou část pulsního měniče a nakonec vybereme snímač proudu, který je nezbytný pro návrh řízení. Měnič by měl být navrhnout tak, aby splňoval potřebné požadavky pro elektrickou tříkolku, jako jsou:

- schopnost pracovat v motorickém a generátorickém režimu
- možnost nastavení zpětné rychlosti
- možnost brzdění v generátorickém režimu



Obr. 9.5: Zapojení čtyřkvadrantového pulsního měniče (informace čerpány z [27])

Pro splnění výše uvedených funkcí je třeba vytvořit návrh v podobě čtyřkvadrantového pulsního měniče (obr. 9.5), který bude pracovat v režimu snižování napětí. Pomocí zapojení je možno měnit polaritu napětí (měnit směr otáčení hřídele) a směr proudu.

V prvním kvadrantu bude vozidlo pohánět (motorický režim – kladné napětí i směr proudu). V druhém se změní směr proudu, takže stroj bude pracovat jako dynamo (generátorický režim – kladné napětí a záporný směr proudu). V třetím kvadrantu se nám změní polarita napětí, takže se změní směr otáčení hřídele a vozidlo bude couvat (motorický režim – záporné napětí i směr proudu) a nakonec ve čtvrtém se opět změní směr proudu na kladný ovšem se záporným napětím, takže vozidlo bude brzdit (generátorický režim – záporné napětí a kladný směr proudu). Schéma na obr. 9.5 je tvořeno větvemi A a B, přičemž každá z nich je sestavena z paralelního spojení horního a dolního spínače [27].

9.3.1 Proudové a napět'ové dimenzování

Dimenzování spínacích tranzistorů pulsního měniče:

Pracovní napětí tranzistoru i nulové diody má teoreticky velikost U_d . V praxi je ovšem třeba brát ohled i na přepětí způsobené parazitními indukčnostmi smyčky tvořené ze tří prvků: mezilehlý napět'ový zdroj – transistor – nulová dioda. Jelikož dynamická přepětí dosahují 10 – 20 % mezilehlého napětí U_d , proto jsou polovodičové prvky s rezervou dimenzovány na závěrné napětí $2U_d$. V této kapitole jsou informace čerpány z literatury [27].

Při proudovém dimenzování zanedbáváme pilovité zvlnění proudu. Pro výpočet špičkové, střední a efektivní hodnoty proudů protékajících tranzistorem je třeba znát maximální proud tekoucí obvodem, což je maximální proud I_{max} , který můžeme pro oba typy tříkolek vypočítat jako:

$$I_{max1} = \frac{M_{max1}}{M_{j1}} I_{j1} = \frac{3,3}{1,6} \cdot 33 \doteq 68A \quad (9.2)$$

$$I_{max2} = \frac{M_{max2}}{M_{j2}} I_{j2} = \frac{1,7}{1,3} \cdot 22 \doteq 29A \quad (9.3)$$

Typ tříkolky	Model motoru	Jmen. moment M_j [Nm]	Jmen. proud I_j [A]	Max. moment M_{max} [Nm]	Max. proud I_{max} [A]
do terénu	Atas P2XR492	1,6	33	3,3	68
do interiéru	Atas P2XR508	1,3	22	1,7	29

Tab. 9.1: Technické parametry navržených DC motorů

Nyní můžeme vypočítat špičkové, střední a efektivní hodnoty proudů protékajících tranzistorem. Střída byla zvolena $s = 0,5$:

$$I_{C_{\max 1}} = I_{\max 1} = \underline{68A} \quad (9.4)$$

$$I_{C_{\text{stř}1}} = I_{\max 1} \cdot s = 68 \cdot 0,5 = \underline{34A} \quad (9.5)$$

$$I_{C_{\text{ef}1}} = I_{\max 1} \cdot \sqrt{s} = 68 \cdot \sqrt{0,5} \doteq \underline{48A} \quad (9.6)$$

$$I_{C_{\max 2}} = I_{\max 2} = \underline{29A} \quad (9.7)$$

$$I_{C_{\text{stř}2}} = I_{\max 2} \cdot s = 29 \cdot 0,5 = \underline{14,5A} \quad (9.8)$$

$$I_{C_{\text{ef}2}} = I_{\max 2} \cdot \sqrt{s} = 29 \cdot \sqrt{0,5} \doteq \underline{21A} \quad (9.9)$$

Kde s je střída

9.3.2 Výpočet ztrát výkonového obvodu

V této kapitole jsou informace čerpány z literatury [26] a [27]. Výpočtem ztrát ve výkonovém obvodu máme namysli výpočet ztrát na aktivních prvcích měniče – tranzistoru a nulové diody. Na základě získaných hodnot je pak možno určit účinnost měniče. Při provozu můžou vznikat dva druhy ztrátových výkonů:

- ztráty vedením proudu
- přepínací ztráty výkonového tranzistoru

Ztráty vedením proudu:

Jestliže vezmeme v úvahu, že z velké části bude měnič pracovat v oblasti vysokých otáček, tak se hodnota střídy s bude blížit jedné. Ve výpočtech tedy budeme uvažovat střídu $s = 1$ (měnič bude plně otevřen). Navrhovaný měnič bude vybaven tranzistorem typu MOS – FET IRFS3207PBF [28]:

Typ tranzistoru	Max. proud I_D [A]	Průrazné napětí U_{DSS} [V]	Cena (za 1 kus) [kč]	Odpor tranz. $R_{DS(on)}$ [mΩ]	Doba zapnutí t_{on} [ns]	Doba vypnutí t_{off} [ns]	Přepínací kmitočet f [kHz]
MOS – FET IRFS3207	170	75	99	4,5	92	166	25

Tab. 9.2: Parametry tranzistoru MOS – FET IRFS3207PBF [28]

V tab. 9.2 jsou parametry navrženého tranzistoru, který je schopen spínat proud o velikosti maximálně $I_D = 170A$. Jestliže budeme brát v úvahu vlastnosti pouzdra, tak je maximální hodnota proudu omezena na $70A$. Průrazné napětí dosahuje $U_{DSS} = 75V$, což představuje dostatečně velkou rezervu (napětí meziobvodu je u obou tříkolek $U_d = 24V$). Součástí tranzistoru je i antiparalelní dioda.

Ztráty způsobené vedením proudu tranzistorem můžeme vypočítat podle vztahů 9.12 a 9.13. Efektivní hodnota proudu tranzistoru bude:

$$I_{Cef1} = I_{max1} \cdot \sqrt{s} = 68 \cdot \sqrt{1} = \underline{68A} \quad (9.10)$$

$$I_{Cef2} = I_{max2} \cdot \sqrt{s} = 29 \cdot \sqrt{1} = \underline{29A} \quad (9.11)$$

$$P_{ztr,v1} = R_{DS(on)} \cdot I_{Cef1}^2 = 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot 68^2 \doteq \underline{10W} \quad (9.12)$$

$$P_{ztr,v2} = R_{DS(on)} \cdot I_{Cef2}^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 29^2 \doteq \underline{4W} \quad (9.13)$$

Nyní byly vypočteny ztráty způsobené vedením proudu jedním tranzistorem. Jak už bylo uvedeno, tranzistor bude schopen spínat proud o maximální velikosti $70A$, a tak pro pokrytí proudových špiček bude u výkonového obvodu do terénu ke každému ze čtyř tranzistorů připojen ještě jeden paralelně. Do vztahu 9.12 bylo pak dosazeno za odpor $R_{DS(on)} = 2,25m\Omega$. Celkové ztráty vedením proudu tranzistory jsou:

$$P_{clk,v1} = 8P_{ztr,v1} = 8 \cdot 10 = \underline{80W} \quad (9.14)$$

$$P_{clk,v2} = 4P_{ztr,v2} = 4 \cdot 4 = \underline{16W} \quad (9.15)$$

Přepínací ztráty výkonového tranzistoru:

Jestliže známe přepínací kmitočet tranzistoru f , pak střední ztrátový přepínací výkon můžeme vypočítat jako:

$$P_{ztr,p1} = f (W_{on1} + W_{off1}) = 25 \cdot 10^3 \cdot (75,1 \cdot 10^{-6} + 135 \cdot 10^{-6}) \doteq \underline{5,3W} \quad (9.16)$$

$$P_{ztr,p2} = f (W_{on2} + W_{off2}) = 25 \cdot 10^3 \cdot (32 \cdot 10^{-6} + 57,8 \cdot 10^{-6}) \doteq \underline{2,2W} \quad (9.17)$$

Kde W_{on} je ztrátová energie jednoho zapnutí tranzistoru

W_{off} je ztrátová energie jednoho vypnutí tranzistoru

$$W_{on1} = \frac{1}{2} \cdot U_{d1} \cdot I_{max1} \cdot t_{on} = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 68 \cdot 92 \cdot 10^{-9} \doteq \underline{75,1 \cdot 10^{-6} J} \quad (9.18)$$

$$W_{on2} = \frac{1}{2} \cdot U_{d2} \cdot I_{max2} \cdot t_{on} = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 29 \cdot 92 \cdot 10^{-9} \doteq \underline{32 \cdot 10^{-6} J} \quad (9.19)$$

$$W_{off1} = \frac{1}{2} \cdot U_{d1} \cdot I_{max1} \cdot t_{off} = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 68 \cdot 166 \cdot 10^{-9} \doteq \underline{135 \cdot 10^{-6} J} \quad (9.20)$$

$$W_{off2} = \frac{1}{2} \cdot U_{d2} \cdot I_{max2} \cdot t_{off} = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 29 \cdot 166 \cdot 10^{-9} \doteq \underline{57,8 \cdot 10^{-6} J} \quad (9.21)$$

Celkové přepínací ztráty navrhovaného měniče potom vypočteme stejně jako v předchozím případě:

$$P_{clk,p1} = 8P_{ztr,p1} = 8 \cdot 5,3 \doteq \underline{42,4W} \quad (9.22)$$

$$P_{clk,p2} = 4P_{ztr,p2} = 4 \cdot 2,2 \doteq \underline{8,8W} \quad (9.23)$$

Celkové ztráty výkonového obvodu:

Součtem ztrát způsobené vedením proudu a přepínacími ztrátami dostaneme celkové ztráty výkonového obvodu. Pro navržený měnič pro tříkolku do terénu dosahují ztráty hodnoty $122W$ a do interiéru $25W$.

$$P_{clk,ztr1} = P_{clk,v1} + P_{clk,p1} = 80 + 42,4 \doteq \underline{122W} \quad (9.24)$$

$$P_{clk,ztr2} = P_{clk,v2} + P_{clk,p2} = 16 + 8,8 \doteq \underline{25W} \quad (9.25)$$

9.3.3 Výpočet výkonu pulsního měniče

Pro výpočet příkonu můžeme použít vztah:

$$P_{pr1} = I_{max1} \cdot U_{d1} = 68 \cdot 24 = 1632W \doteq \underline{1,63kW} \quad (9.26)$$

$$P_{pr2} = I_{max2} \cdot U_{d2} = 29 \cdot 24 = 696W \doteq \underline{0,7kW} \quad (9.27)$$

A jelikož známe ztráty výkonového obvodu, pak výkon pulsního měniče vypočítáme jako:

$$P_{vy1} = P_{pr1} - P_{clk,ztr1} = 1632 - 122 = 1510W \doteq \underline{1,5kW} \quad (9.28)$$

$$P_{vy2} = P_{pr2} - P_{clk,ztr2} = 696 - 25 = 671W \doteq \underline{0,67kW} \quad (9.29)$$

Účinnost pulsního měniče η_m se rovná:

$$\eta_{m1} = \frac{P_{vy1}}{P_{pr1}} \cdot 100 = \frac{1510}{1632} \cdot 100 \doteq \underline{92,5\%} \quad (9.30)$$

$$\eta_{m2} = \frac{P_{vy2}}{P_{pr2}} \cdot 100 = \frac{671}{696} \cdot 100 \doteq \underline{96,4\%} \quad (9.31)$$

V této kapitole byly informace čerpány z literatury [11].

9.3.4 Návrh kondenzátorů pro výkonový obvod

V napěťovém meziobvodu je třeba připojit soustavu paralelně spojených kondenzátorů, která zajistí velkou kapacitu a vytvoří ochranu proti vysokým proudům. Jestliže známe maximální proud protékající meziobvodem ($I_{max1} = 68A$ a $I_{max2} = 29A$), pak efektivní proud tekoucí kondenzátory I_{Kef} je roven [29]:

$$I_{Kef1} = I_{max1} \sqrt{s(1-s)} = 68 \cdot \sqrt{0,5 \cdot (1-0,5)} = \underline{34A} \quad (9.32)$$

$$I_{Kef2} = I_{max2} \sqrt{s(1-s)} = 29 \cdot \sqrt{0,5 \cdot (1-0,5)} = \underline{14,5A} \quad (9.33)$$

Pro návrh byl zvolen elektrolytický kondenzátor od společnosti Jamicon (E470M/50VT). Maximální přípustný proud, který může protékat jedním kondenzátorem je 3A. Soustava bude tedy obsahovat **12** paralelně spojených kondenzátorů pro tříkolku do terénu a **5** kondenzátorů pro tříkolku do interiéru [30].

9.3.5 Snímač proudu

Pro řízení motoru je třeba znát aktuální proud. Pro snímání proudu se ve zpětnovazebních řídicích aplikacích velmi často používají galvanicky oddělené snímače s Hallovo sondou. Funkce těchto snímačů je založena na kompenzaci magnetických účinků měřeného proudu [31]. Pro náš návrh bude použit snímač proudu (LA 55-P/SP1) od firmy LEM. Maximální proud protékající výkonovým obvodem je 68A, proto byl vybrán snímač schopný měřit proud až do 100A [32].

10. Celkové finanční náklady

Jedním z hlavních cílů této práce bylo navržení technických komponentů pohonu elektrické tříkolky, které budou finančně nenákladné, ale zároveň budou efektivní pro účely uživatele. V tabulce 10.1 jsou sepsány ceny za jednotlivé navržené komponenty pro elektrickou tříkolku do terénu a v tab. 10.2 do interiéru:

Druh komponentu	Typ	Výrobce	Sériové číslo	Počet kusů	Cena (za 1 kus) [kč]
Motor	DC	Atas	P2XR492	1	3461
Akumulátor	VRLA (gel)	YUCELL	PG26-12	2	1410
Výkonový obvod	DC/DC měnič	-	-	1	1308
Řídící obvody	-	-	-	-	1200*
Převodovka	Jedno- stupňová	Atas	-	1	850
Celkem:	-	-	-	5	8229

Tab. 10.1: Ceny za jednotlivé navržené komponenty pro pohon elektrické tříkolky do terénu

Druh komponentu	Typ	Výrobce	Sériové číslo	Počet kusů	Cena (za 1 kus) [kč]
Motor	DC	Atas	P2XR508	1	3377
Akumulátor	VRLA (AGM)	YUCELL	PR12-12	2	523
Výkonový obvod	DC/DC měnič	-	-	1	845
Řídící obvody	-	-	-	-	1200*
Převodovka	Jedno- stupňová	Atas	-	1	850
Celkem:	-	-	-	5	6795

Tab. 10.2: Ceny za jednotlivé navržené komponenty pro pohon elektrické tříkolky do interiéru

* Návrh řídicích obvodů může být námětem pro budoucí práci. Cena byla vytvořena odhadem.

10. Celkové finanční náklady

Celková cena pro pořízení navržených komponentů tedy činí pro tříkolku do terénu cca 8200 Kč a do interiéru 6800 Kč. Jestliže uvážíme, že běžná cena jednoduché tříkolky bez pohonu stojí cca 10000 Kč [33], pak se dostaneme na částky:

$$N_{clk1} \approx \underline{\underline{18200\text{kč}}} \quad (10.1)$$

$$N_{clk2} \approx \underline{\underline{16800\text{kč}}} \quad (10.2)$$

Kde N_{clk1} jsou celkové náklady pro el. tříkolku do terénu

N_{clk2} jsou celkové náklady pro el. tříkolku do interiéru

Pro porovnání cen můžeme uvést jednu z elektrických tříkolek, která je dostupná na českém trhu:

Výrobce	Sériové číslo	Typ motoru	Výkon motoru	Dojezd na jedno nabití	Cena [kč]
ELSPORT	ME01	Hub (EC)	350 W	15 km	28700

Tab. 10.3: Prodejní cena komerčně dostupné elektrické tříkolky [33]

11. Závěr

Tato práce se zabývá návrhy pohonu pro dva typy elektrických tříkolek (typ do terénu a interiéru). Návrhy zahrnují celkovou koncepci pohonu.

Nejprve byla vytvořena energetická bilance řešené soustavy, na základě které byla vykreslena momentově-otáčková (resp. výkonově-otáčková) charakteristika pohonu. Pro rozjezd do maximálního stoupání musí tříkolka do terénu vyvinout kroutící moment $52Nm$ (na ose hnaných kol) a do interiéru $30,5Nm$. Tomu odpovídá maximální tažná síla o velikosti $F_{max1} = 226N$ a $F_{max2} = 133N$.

Dále byla navržena vhodná koncepce motoru a převodovky. Motor byl umístěn do zadní části vozidla s jednostupňovou převodovkou od firmy Atas, která slouží pro potřebnou redukci otáček motoru. Mezi hřídelí převodovky a osou zadních kol je pak použit řetězový převod. Tato koncepce se jeví jako nejefektivnější.

Následně byla vytvořena studie použitelných typů elektrických strojů (porovnání jejich výhod a nevýhod), podle které byly pak vybrány dva nejvhodnější typy: asynchronní motor s kotvou nakrátko a stejnosměrný motor s permanentními magnety. Oba motory byly pak konkrétně vytipovány z dostupných zdrojů, byly k nim vytvořeny příslušné momentově-otáčkové charakteristiky a případně stanoveny jejich nové jmenovité body. Na základě vypočtených hodnot a získaných informací byly porovnány obě navržené varianty. Při volbě asynchronního motoru by byla potřeba motor převinout a použít DC/AC střídač, ten je technicky i cenově náročnější než DC/DC měnič. Pro tuto aplikaci byly proto vybrány stejnosměrné motory s permanentními magnety od firmy Atas. Motor do terénu dosahuje jmenovitého výkonu $603W$ a do interiéru $381W$.

Byla provedena rešeršní studie všech v úvahu připadajících typů akumulátorů pro tuto aplikaci. S uvážením všech výhod a nevýhod byla vybrána vhodná technologie. Dále byla vypočtena pro oba typy elektrických tříkolek potřebná kapacita akumulátoru a provedeno jejich konkrétní vytipování. Pro elektrickou tříkolku do terénu byl zvolen akumulátor VRLA (gelový typ) a do interiéru akumulátor VRLA (typ AGM) – oba od firmy Yucell. S navrženými akumulátory bude předpokládaný dojezd u první tříkolky cca $30km$ a u druhé $20km$.

V další kapitole této práce se zabýváme návrhem pulsního DC/DC měniče. Pro splnění hlavních požadavků (jízda vpřed, jízda vzad, rekuperace energie) byl zvolen čtyřkvadrantový pulsní měnič. Při střídě $s = 1$ bude měnič plně otevřen a motor o napájecím napětí $24V$ bude dosahovat jmenovitých otáček, při kterých bude vozidlo dosahovat maximální rychlosti ($v_{max1} = 19 km/h$ a $v_{max2} = 13 km/h$). Návrh zahrnuje proudové a napěťové dimenzování polovodičových prvků, vytipování spínacích tranzistorů, výpočet výkonu měniče a také výpočet ztrát výkonového obvodu. Pro snímání proudu tekoucí výkonovým obvodem byl zvolen snímač od firmy LEM.

Závěrem práce jsou vypočteny celkové finanční náklady pro pořízení jednotlivých komponentů. Cílem této práce bylo navržení celkové koncepce pohonu pro dva typy elektrických tříkolek. Jednotlivé návrhy byly v práci podrobně zpracovány a komponenty vytipovány z dostupných zdrojů. Tímto můžeme považovat jednotlivé body zadání za splněné.

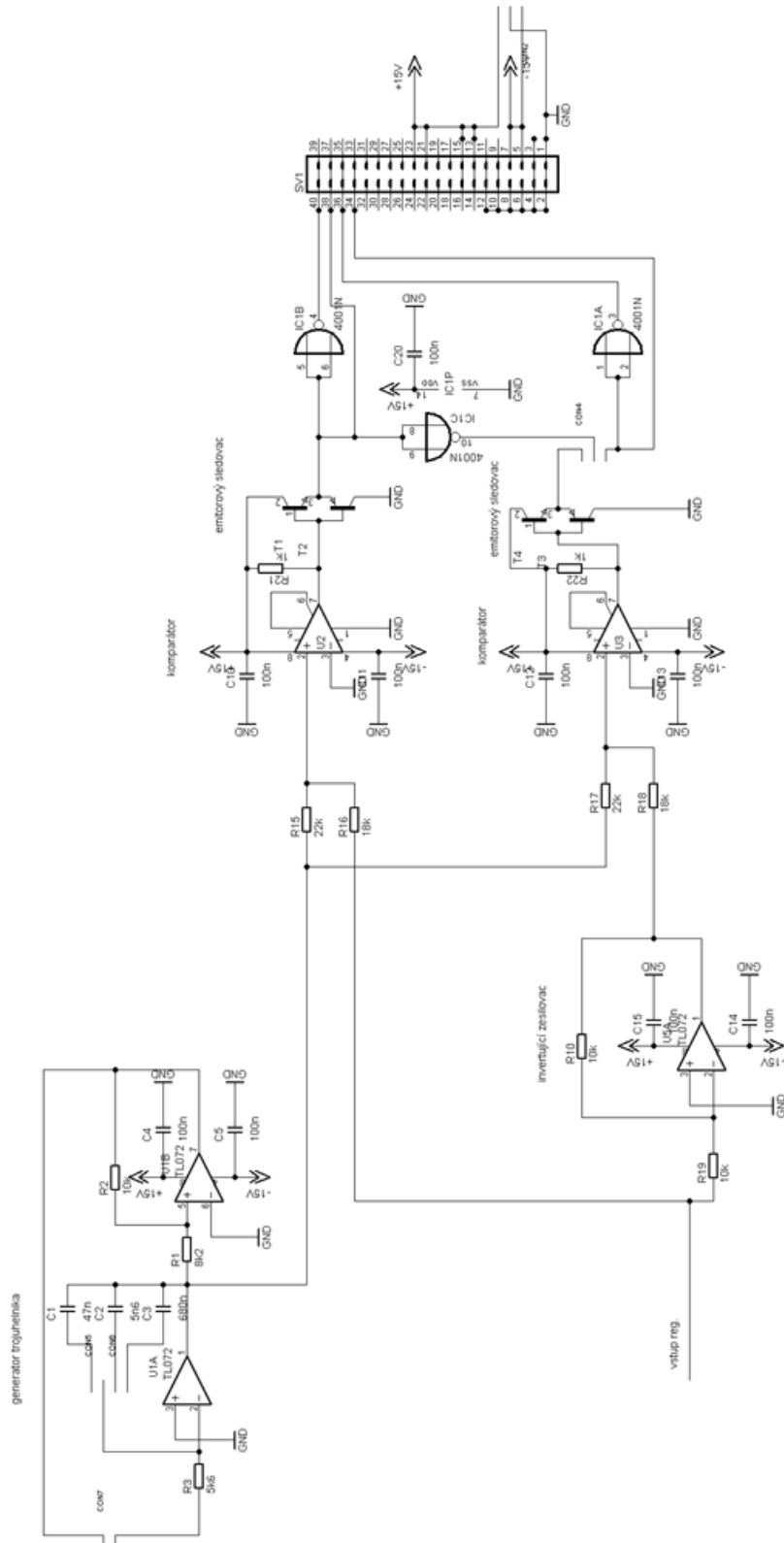
Pro sestavení kompletního návrhu je ještě zapotřebí vytvořit řídicí obvod. Toto téma je však dosti obsáhlé a tak jeho realizace může být námětem pro budoucí bakalářskou či diplomovou práci. V přílohách 13.1 a 13.2 je ukázáno možné řešení budoucího projektu. Řídicí obvody jsou převzaty z literatury [34].

12. Použitá literatura

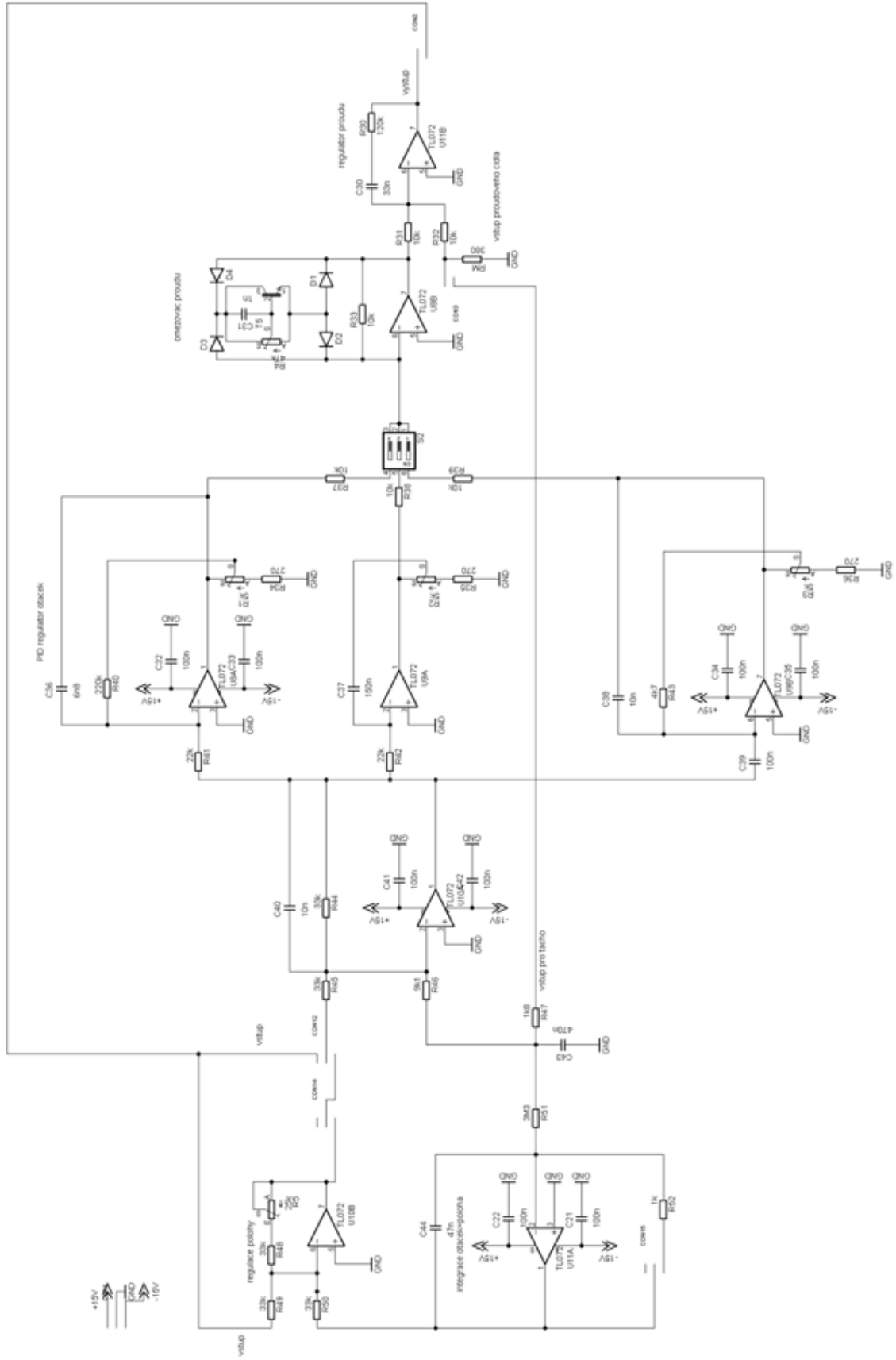
- [1] Elektrikmotion.com.: <http://www.elektrikmotion.com/electrictrike.htm> , 2011-01
- [2] Malenovský, E., Houfek, L., Švancara, P., Krejčí, P.: *Studijní opory z dynamiky.*, <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/index.html>, 2010-11
- [3] Wikipedia.org.: http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavní_strana , 2010-10
- [4] Procházka, P.: *Využití palivových článků v trakčních pohonech*, dizertační práce, 2010, 90s., VUT v Brně, FEKT, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=32798, 2010-11
- [5] Ebikes.ca :, <http://www.ebikes.ca/hubmotors.shtml> , 2010-11
- [6] Goldenmotor.sk.: <http://www.goldenmotor.sk/elektricke-bicykle/elektromotor/>, 2010-10
- [7] Elektromotokola.cz :, <http://www.elektromotokola.cz>, 2010-11
- [8] Mti.tul.cz :, http://www.mti.tul.cz/files/elm/ZE_Elektricke_stroje.pdf, 2010-12
- [9] E-automatizace.cz.: <http://www.e-automatizace.cz/>, 2010-12
- [10] Vorel, P.: *Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech*, habilitační práce, 2005, 137s., VUT v Brně, FEKT, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2010-12
- [11] Ondrušek, Č.: *Elektrické stroje*, skripta, 117s., VUT v Brně, FEKT, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2010-12
- [12] *Akční členy – Elektromotory*, přednášky z předmětu IPR, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky, 2010-11
- [13] Jaja.kn.vutbr.cz.: <http://jaja.kn.vutbr.cz/~huzlik/EC%20motor.pdf>, 2011-01
- [14] Uzimex.cz.: http://www.uzimex.cz/soubory/20031203_tat_2003-11_12.pdf, 2011-01
- [15] Odbornecasopisy.cz.: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26832, 2011-01
- [16] Odbornecasopisy.cz.: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37206, 2011-02

- [17] Elektromotory.net.: <http://www.elektromotory.net/> , 2011-02
- [18] Atas.cz.: http://www.atas.cz/files/P2X_cz.pdf , 2011-02
- [19] Atas.cz.: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=28&lng=cz>
- [20] Schmachtl.cz.: <http://www.schmachtl.cz/download/?action=download&did=241> , 2011-02
- [21] Battery.cz.: <http://www.battery.cz> , 2011-03
- [22] Wikipedia.org.: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate , 2011-01
- [23] Iloveebikes.com.: <http://www.iloveebikes.com/batteries.html>, 2011-01
- [24] A123systems.com.: <http://www.a123systems.com/>, 2011-03
- [25] Battery-import.cz.: <http://www.battery-import.cz> , 2011-03
- [26] Patočka, M.: *Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek I, Tepelné jevy, činný výkon*, skripta, 2004, 61 s., VUT v Brně, FEKT, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2011-03
- [27] Patočka, M.: *Vybrané statě z výkonové elektroniky. Svazek II, Měníče bez impulsního transformátoru*, skripta, 2004, 175 s., VUT v Brně, FEKT, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2011-04
- [28] Irf.com.: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfs3207pbf.pdf>, 2011-04
- [29] Pandatron.cz.: http://pandatron.cz/?1713&power_tipy_xxi_hlidejte_rms_proud_kondenzatoru, 2011-04
- [30] Gme.cz.: <http://www.gme.cz/cz/e470m-50vt-p123-162.html>
- [31] Fsid.cvut.cz.: http://www.fsid.cvut.cz/cz/U12110/vyzkum/Zeliv08/cd/EL/Zeliv_EL_05.pdf, 2011-04
- [32] Lem.com.: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymode/1/id,90.13.25.001.0/, 2011-04
- [33] Trikolky.eu.: <http://www.trikolky.eu/>, 2011-04
- [34] Němec, M.: *Tranzistorové pulzní měniče*, diplomová práce, 2011, 60 s., VUT v Brně, FEKT, 2011-05

13. Přílohy



Obr. 13.1: Schéma řídicího obvodu [34]



Obr. 13.2: Schéma řídicího obvodu [34]