

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Optimální varianta přestavby automobilu na elektromobil

Optimal variant of converting a car into an electromobil

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Management energetiky a elektrotechniky

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vítek, CSc.

Bc. Filip Smrčka

Praha 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smrčka** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **440721**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Management energetiky a elektrotechniky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimální varianta přestavby automobilu na elektromobil

Název diplomové práce anglicky:

Optimal variant of converting a car into an electromobil

Pokyny pro vypracování:

Účel přestavby automobilu na elektromobil, vymezení problému
Sestavení variant elektrického pohonu a řízení otáček
Investiční a provozní výdaje variant pro individuální a hromadnou přestavbu
Ekonomické posouzení a doporučení pro investora

Seznam doporučené literatury:

VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. Elektromechanické měniče. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
KISLINGEROVÁ, Eva. Manažerské finance. 3. vyd. V Praze: C.H. Beck, 2010. Beckova edice ekonomie. ISBN 978-80-7400-194-9

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Miroslav Vitek, CSc., 13116

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

Datum zadání diplomové práce: **13.01.2020** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Miroslav Vitek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Praha, 22.5.2020

.....

Děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc., za poskytnuté rady, nápady a trpělivost při konzultacích. Rovněž děkuji svým rodičům za podporu při studiu.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je popis vybraných možných způsobů řešení situace, kdy je v automobilu nefunkční spalovací motor nahrazen elektromotorem. Popsány jsou možné varianty pohonu, tj. použitelné druhy motorů a způsoby řízení otáček; diskutovány jsou rovněž aplikovatelné technologie akumulátorů. Závěrečná část práce je věnována ekonomickému posouzení jednotlivých variant a výběru optimální varianty.

KLÍČOVÁ SLOVA

automobil, elektromobil, přestavba, pohon

ABSTRACT

This Master's thesis is attempting to give an overview of available options when a faulty internal combustion engine is replaced by an electric motor in a car. Possible motor types, speed control systems and usable battery technologies are discussed. The final part of this thesis is dedicated to an economic evaluation of the proposed variants and the optimal variant is chosen.

KEYWORDS

car, automobile, electromobile, EV, conversion

Obsah

1	Účel přestavby automobilu	13
2	Parametry vozidla před přestavbou.....	14
2.1	Technické parametry motoru.....	14
2.2	Technické parametry převodovky	15
2.3	Technické parametry karoserie.....	17
3	Elektropohon.....	19
3.1	Požadovaný výkon.....	19
3.2	Otáčky motoru	22
4	Přestavba	24
4.1	Stejnoseměrné motory.....	24
4.2	Střídavé motory	33
4.3	Technologie akumulátorů.....	38
4.4	Ostatní.....	49
4.5	Sestavení variant.....	52
5	Investiční a provozní výdaje	54
5.1	Investiční výdaje.....	54
5.2	Provozní výdaje	56
5.3	Hromadná přestavba	58
6	Ekonomické posouzení variant.....	60
7	Závěr.....	66
	Citovaná literatura.....	68
	Seznam příloh	73
	Přílohy.....	74

1 Účel přestavby automobilu

Elektromobilita je v současné době poměrně často skloňované slovo. Obvykle se tímto pojmem rozumí situace, kdy se jednotlivec na trhu s automobily rozhoduje, jestli jeho nový vůz bude poháněn tradičním spalovacím motorem, nebo se stane „pionýrem zelené technologie“ a bude provozovat elektromobil. Rovněž jsou často zmiňovány a hodnoceny klady a zápory této technologie; ty již byly mnohokrát diskutovány a popsány, v této práci proto nebudou dále rozebírány.

V této práci se budu zabývat přestavbou automobilu Suzuki Ignis druhé generace, který byl zcela provozuschopný a byl dle platné legislativy způsobilý k provozu na pozemních komunikacích. Po dopravní nehodě v roce 2011 však došlo k poškození karoserie (střechy) vozidla, která byla následně odstraněna, čímž vozidlo pozbylo své zákonné způsobilosti k provozování na veřejných komunikacích. Ostatní funkce automobilu, tj. zejména motor, elektrické řídicí systémy a hydraulický systém brzd, zůstaly zachovány; automobil byl provozován jako „zahradní traktor“ k převozu materiálu na soukromých pozemcích. V nedávné době ovšem došlo k nespécifikovatelné závadě, kvůli které nebylo automobil možné nastartovat (pravděpodobně se jednalo o závadu řídicí jednotky), a spalovací motor (včetně spojky), výfukový systém, palivová nádrž a části karoserie (střecha a dveře) byly z vozidla demontovány. Průběh demontáže motoru a stav po ní zobrazuje Příloha 1 až Příloha 5.



Obr. 1 – Suzuki Ignis 2. generace (zdroj: motordocor.dk)

2 Parametry vozidla před přestavbou

2.1 Technické parametry motoru

Před vlastním návrhem jednotlivých variant přestavby je nezbytné znát původní parametry vozu, ze kterých bude následně možno stanovit požadavky na elektrický pohon. Některé ze základních parametrů lze získat z technického průkazu vozidla:

Část D) TECHNICKÝ POPIS VOZIDLA		ZMĚNA
ZTP č.: [REDAKCE] ES č.: [REDAKCE]		(ZTP)
Vozidlo	1 Druh vozidla: OSOBNÍ AUTOMOBIL	
	2 KOMBÍ	
	3 Kategorie vozidla (zkratka): M1	
	4 Tovární značka: SUZUKI	
	5 Typ: MH 6 Varianta: Y81S 7 Verze: 5MT	
Motor	8 Obchodní označení: IGNIS 1.5	
	9 Identifikační číslo vozidla (VIN): [REDAKCE]	
	10 Výrobce: MAGYAR SUZUKI C., MAĎARSKO	
	11 Výrobce: SUZUKI M.C., JAPONSKO	
	12 Typ: M15A 13 Palivo: BA 95 B	
Emise	14 Max. výkon [kW]/ot. [min ⁻¹]: 73.0/5 900 15 Zdvih. objem [cm ³]: 1 490	
	16 Předpis EHK OSN č.: 17 Směrnice EHS/ES č.: 2001/100B	
	18 Korigovaný součinitel absorpce:	
Karoserie	19 Výrobce:	
	20 Druh (typ):	
	21 Výrobní číslo (nástavby, kabiny): [REDAKCE]	
Rozměry	22 Barva: ŠEDÁ METALÍZA	
	23 Počet míst: - celkem 5 24 - k sezení: 5 25 - k stání: 0 26 - lůžek: 0	
	27 Maximální zatížení střechy [kg]: 30 28 Objem cisterny - skříně [m ³]:	
	29 Celková [mm]: - délka: 3 770 30 - šířka: 1 605 31 - výška: 1 605	
	32 Rozvor [mm]: 2 360	
Hmotnosti	33 Rozměry ložné plochy [mm]: - délka: 34 - šířka:	
	35 Provozní hmotnost [kg]: 1 085	
	36 Největší technicky přípustná/povolená hmotnost [kg]: 1 480/1 480	
	37 Největší technicky přípustná/povolená hmotnost na nápravu [kg]: 1-2-3-4-... 770/770; 760/760	
	38 Největší svislé statické zatížení spojovacího zařízení (závěs/točnice) [kg]: Z 50	
	39 Největší technicky přípustná/povolená hmotnost připojeného vozidla [kg]: - brzděného: 800/800	
	40 - nebrzděného: 350/350	
41 Největší technicky přípustná/povolená hmotnost jízdní soupravy [kg]: 2 280/2 280		
42 Spojovací zařízení - druh a typ:		
Nápravy	43 Počet náprav - z toho poháněných: 2 - 2	
	Kola a pneumatiky na nápravě (1-2-3-4-...) - rozměry/montáž (zdvojená = „[2]“):	
	44 1. 5 J X 15 ET 45; 185/60 R15 84 H	
	45 2. 5 J X 15 ET 45; 185/60 R15 84 H	
	46 3.	
	47 4.	
	48 Nejvyšší rychlost [km.h ⁻¹]: 165	
49 Brzdy (ANO/NE): - provozní: ANO - říšovací: ANO - zovová: ANO - dechovací: NE		
50 Vnější hluk vozidla [dB (A)]: - stojícího/ot.[min ⁻¹]: 85/4 425 51 - za jízdy: 71.3		
52 Spotřeba paliva: - metodika: ES 1999/100 53 - při rychlosti [km.h ⁻¹]:		
54 [l.100 km ⁻¹]: 9.1 / 6.1 / 7.2		
Vybava (ANO/NE): 55 ABS: ANO 56 Retarder: NE		
57 Razení převodovky (MAN/AUT): MAN		
		TŘÍDA A50-X

Obr. 2 – Technický průkaz vozidla (zdroj: Ing. Miroslav Vítek, CSc.)

Suzuki Ignis (s drobnými úpravami prodáváný v různých částech světa i pod názvy Subaru Justy, Chevrolet Cruze nebo Holden Cruze) byl vyroben v roce 2005 v Maďarsku. V tomto konkrétním případě se jedná o vozidlo s pohonem všech čtyř kol (4×4 , AWD, 4WD). Motor je zážehový řadový čtyřválec DOHC (*double overhead camshaft*), má zdvihový objem $1\,490\text{ cm}^3$ a je vybaven variabilním časováním ventilů (VVT). Při kompresním poměru 9,5:1 motor generuje výkon 73 kW při 5 900 ot./min a krouticí moment 133 Nm při 4 100 ot./min [1].

2.2 Technické parametry převodovky

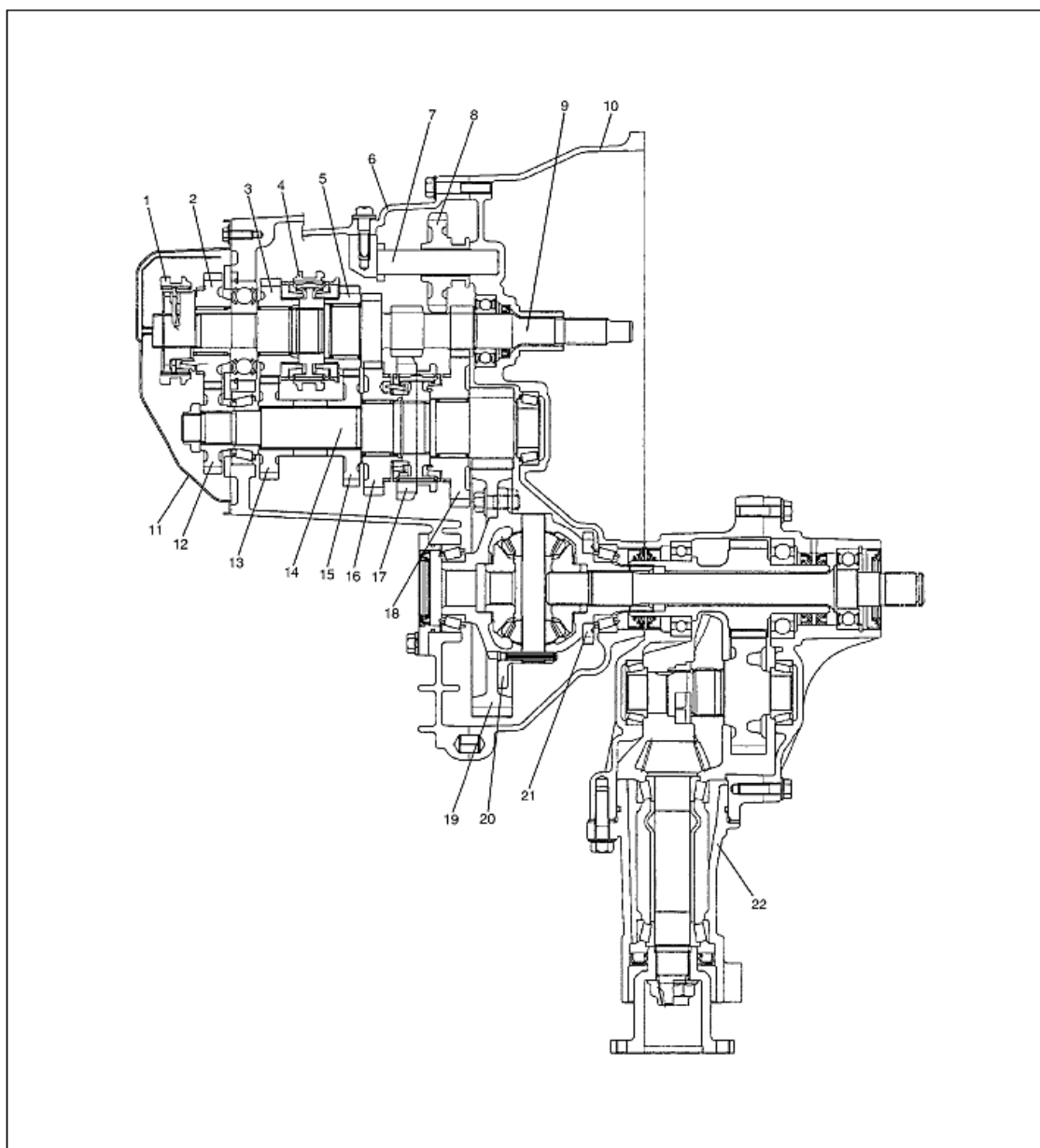
Stejný typ motoru, který byl instalován v předmětném voze (typ M15A VVT), byl užíván rovněž v modelu Swift, z jehož specifikací lze zjistit převodové poměry jednotlivých převodových stupňů [2]:

1. stupeň	3,545:1
2. stupeň	1,904:1
3. stupeň	1,310:1
4. stupeň	0,969:1
5. stupeň	0,769:1
R (zpátečka)	3,250:1.

K těmto poměrům je při výpočtech nutno ještě uvažovat stálý převod mezi předlohovým hřídelem převodovky (na Obr. 3 označen číslem 14) a poháněnou poloosou (označena číslem 19), který má hodnotu 4,11:1 [3]. Tyto hodnoty budou v následujících kapitolách využity ke stanovení potřebných otáček elektromotoru.

Pokud by vozidlo po přestavbě dosahovalo příliš vysoké rychlosti, bylo by možno ji snížit přidáním stálého převodu (např. pomocí řetězu nebo řemenu) před převodovku.

Model s pohonem všech kol využívá na zadní nápravě diferenciál, jehož svornost reguluje mezinápravová viskózní spojka. Veškeré součásti související s pohonem všech kol zůstanou na vozidle funkční a budou využity i po přestavbě.

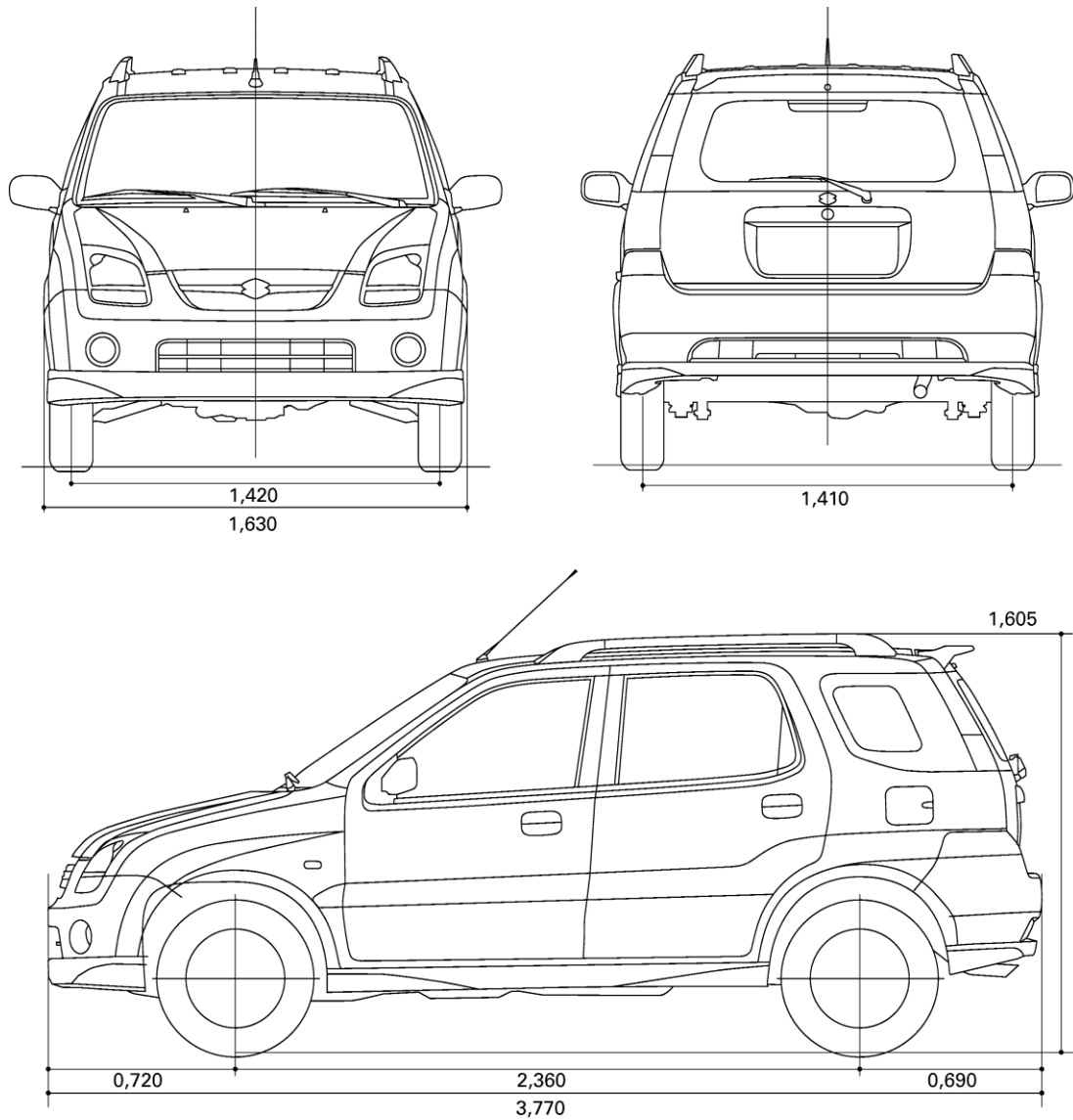


1. 5th speed sleeve & hub	7. Reverse gear shaft	13. counter shaft 4th gear	19. Final gear
2. Input shaft 5th gear	8. Reverse idler gear	14. counter shaft	20. Differential case
3. Input shaft 4th gear	9. Input shaft	15. counter shaft 3rd gear	21. Vehicle speed sensor rotor
4. High speed sleeve & hub	10. Right case	16. counter shaft 2nd gear	22. Transfer assembly
5. Input shaft 3rd gear	11. Side cover	17. Low speed sleeve & hub	
6. Left case	12. counter shaft 5th gear	18. counter shaft 1st gear	

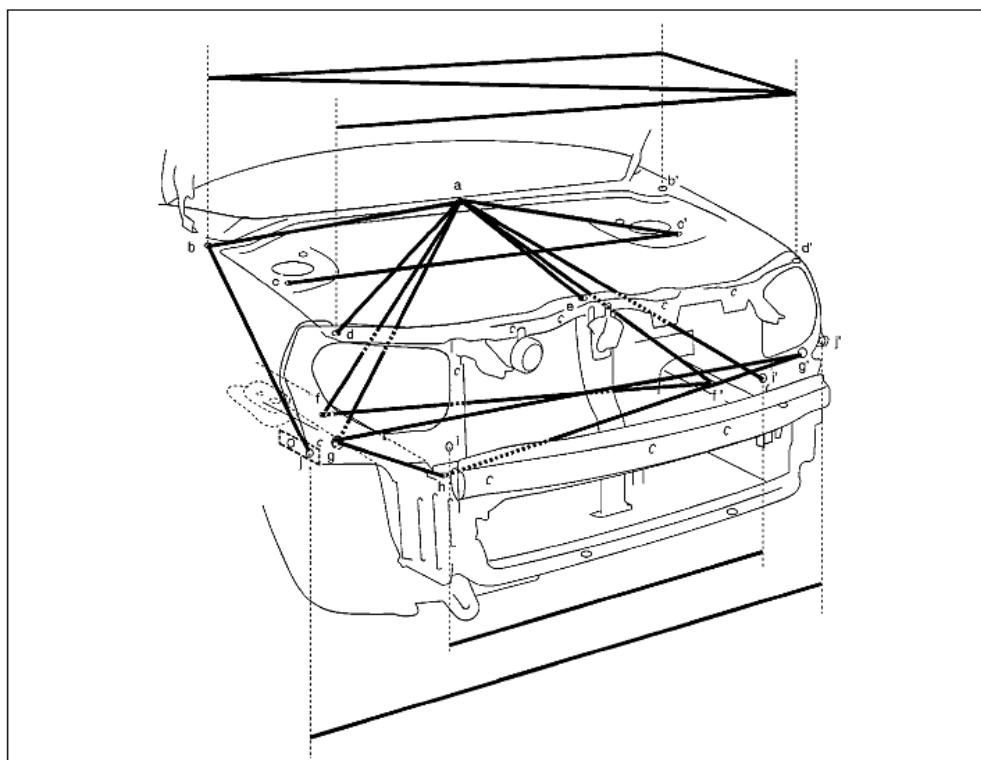
Obr. 3 – Schéma převodovky (zdroj: dílenská příručka s. 1359; manualslib.com)

2.3 Technické parametry karoserie

Z dostupných nákresů je možno přibližně odhadnout velikost prostoru pro motor v přední části vozidla, případně velikost prostoru pro akumulátory nebo náklad v části zadní.



Obr. 4 – Rozměry karoserie vozu (zdroj: getoutlines.com)



a. Garnish installation center hole (ø5)	e. Hood cushion installation hole	i (i'). Head light installation hole
b (b'). Front fender installation hole	f (f'). Engine mounting installation front hole	j (j'). Front fender installation hole
c (c'). Strut installation front hole	g (g'). Jig hole (ø15 mm)	
d (d'). Front fender installation hole	h. Bumper member upper side installation hole	

Hole to hole distance

a-b: 673 mm (26.50 in.)	a-i': 799 mm (31.46 in.)	f-f': 952 mm (37.48 in.)
a-c': 583 mm (22.95 in.)	b-b': 1340 mm (52.76 in.)	g-g': 1315 mm (51.77 in.)
a-d: 760 mm (29.92 in.)	b-d': 1393 mm (58.84 in.)	g-h: 230 mm (9.06 in.)
a-e: 599 mm (23.58 in.)	b-j: 671 mm (26.42 in.)	g'-h: 1139 mm (44.84 in.)
a-f: 774 mm (30.47 in.)	b'-d': 401 mm (15.79 in.)	i-i': 922 mm (36.30 in.)
a-f': 802 mm (31.57 in.)	c-c': 1098 mm (43.23 in.)	j-j': 1343 mm (52.87 in.)
a-g: 890 mm (35.04 in.)	d-d': 1328 mm (52.28 in.)	

Obr. 5 – Rozměry prostoru pro motor (zdroj: dílenská příručka, s. 3855; manualslib.com)

Z Obr. 4 a Obr. 5 je patrné, že využitelný prostor pro elektromotor (případně i řídicí elektroniku a akumulátory) je cca 60×95×60 cm (V×Š×H). Výška prostoru je určena odhadem, šířka je určena ze vzdálenosti „f-f“ a hloubka ze vzdálenosti „a-e“.

3 Elektropohon

3.1 Požadovaný výkon

První parametr, jehož hodnotu je nutno určit před volbou typu motoru a způsobu řízení jeho otáček, je požadovaný výkon motoru.

Při předpokladu užívání vozu jako „zahradního traktoru“ s vozíkem je ve výpočtech vycházeno z technického průkazu, ve kterém je uvedena nejvyšší technicky přípustná hmotnost jízdní soupravy (tj. součet hmotností vozidla a taženého vozíku s nákladem). V této hodnotě (2 280 kg) je sice uvažováno brzděné přípojné vozidlo, které nebude užíváno, rozdíl v celkové hmotnosti soupravy však vykompenzují přidané baterie. S vědomím drobné chyby lze hmotnost elektromotoru (a s ním souvisejícího příslušenství) uvažovat za shodnou s hmotností spalovacího motoru. Nezanedbatelnou hmotnostní úsporu přineslo odstranění částí karoserie, výpočet je tedy proveden pro hodnotu 2 000 kg.

Požadovaný výkon elektromotoru pro jízdu konstantní rychlostí lze určit ze vztahu

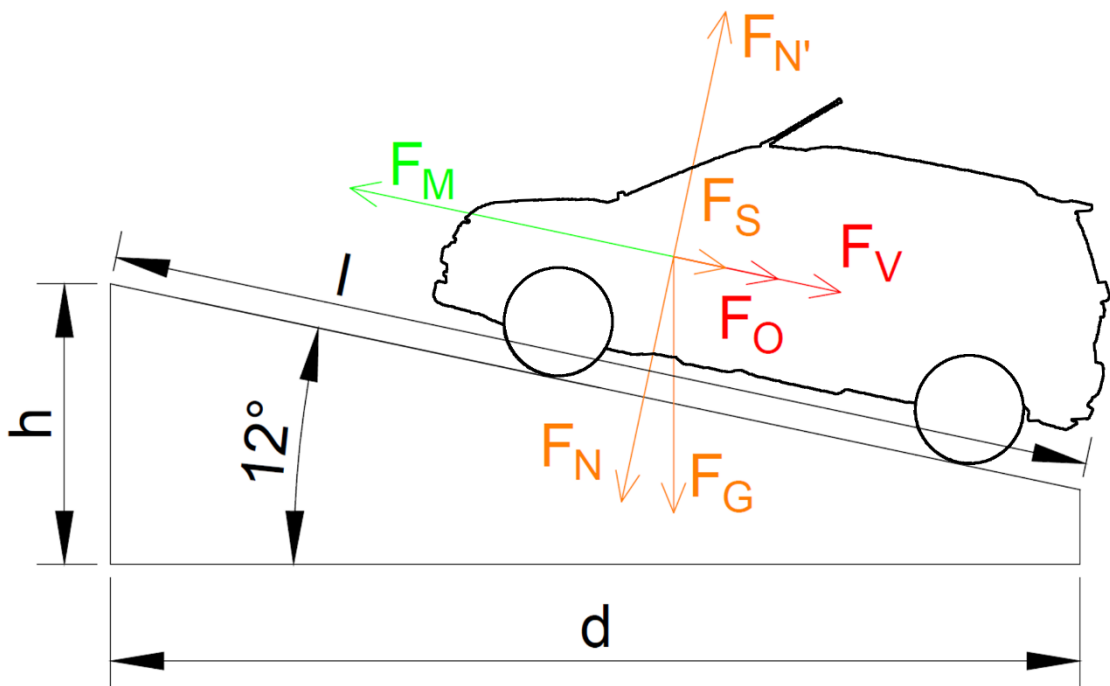
$$P = \frac{F_C \cdot v}{\eta}$$

- kde P je elektrický výkon motoru (W),
 F_C je součet vnějších sil působících na vozidlo (N),
 v je rychlost vozidla (m/s),
 η je celková účinnost přenosu výkonu z motoru na kola (-).

Síly působící na vozidlo lze rozdělit na

- F_V valivý odpor pneumatik,
 F_O odpor vzduchu,
 F_S vliv sklonu pojezděné plochy;

rovněž platí $F_C = F_V + F_O + F_S$, neboť všechny tyto síly působí ve stejném směru (proti směru pohybu vozidla). Pro rovnoměrný přímočarý pohyb platí $-F_C = F_M$, kde F_M je síla působící ve směru pohybu vozidla. Všechny uvažované síly jsou znázorněny na Obr. 6.



Obr. 6 – Síly působící na vozidlo

S ohledem na účel užití vozidla lze předpokládat, že po něm nebude požadováno dosahování vysokých rychlostí – vliv odporu vzduchu (sílu F_O) je tedy možno zanedbat. Při výpočtu požadovaného výkonu je uvažována rychlost v terénu 10 km/h.

Síla F_N reprezentuje sílu kolmou na terén a je vyrovnána silou $F_{N'}$, působící v opačném směru. Zobrazena je pouze jako grafický rozklad gravitační síly F_G do složek F_N a F_S . Výpočtový (maximální předpokládaný) úhel stoupání byl stanoven na hodnotu 12° – 12 metrů stoupání na 100 metrů je značně příkrý svah a při pokusu o zdolání většího stoupání by v terénu nebyl limitujícím faktorem výkon motoru, ale spíše nedostatečná přilnavost pneumatik.

Sílu F_S lze (při zanedbání tření) určit ze vztahu [4]

$$F_S = F_G \cdot \frac{h}{l} = F_G \cdot \sin(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

kde m je hmotnost vozidla (kg),

g je tíhové zrychlení ($9,807 \frac{m}{s^2}$),

α je úhel stoupání (12°).

Dosazením hodnot je získána hodnota $F_S = 2\,000 \cdot 9,807 \cdot \sin(12^\circ) \doteq 4\,078 \text{ N}$.

Valivý odpor pneumatik lze určit ze vztahu

$$F_V = F_N \cdot c = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot c$$

kde F_N je normálová síla působící na terén (N),

c je koeficient valivého odporu (-).

Hodnota koeficientu valivého odporu závisí nejvíce na terénu, pohybuje se v rozmezí od 0,01 pro styk pneumatiky a betonu až po 0,4 pro hluboký písek; uvažována je hodnota z rozsahu pro polní cesty (*Schlaglochstrecken*), tj. 0,05 [5].

Po dosazení je získána hodnota $F_V = 2\,000 \cdot 9,807 \cdot \cos(12^\circ) \cdot 0,05 \doteq 959$ N.

Z vypočtených hodnot lze stanovit hledaný výkon; účinnost převodovky (95 %) byla převzata z [6] jako hodnota naměřená u FWD vozidla při 2 000 ot./min:

$$F_{\text{celková}} = F_S + F_V = (m \cdot g) \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot c)$$

$$P = \frac{(F_{\text{celková}}) \cdot \frac{10}{3,6}}{0,95} = \frac{5\,037 \cdot 2,78}{0,95} \doteq \mathbf{14\,740\,W}$$

V souvislosti s touto hodnotou je nutno poznamenat, že není předpokládáno, že vozidlo bude trvale provozováno ve stoupání. Bude-li konkrétní model elektromotoru dostatečně robustní (zejména co se chlazení vinutí týče), nemusí jeho nominální (trvalý) výkon být dimenzován na tuto vypočtenou hodnotu. Lze předpokládat, že by motor vhodné konstrukce s výkonem kolem 10 kW byl pro uvažované použití dostačující.

3.2 Otáčky motoru

Pro výběr konkrétního modelu elektromotoru je nutné určit jeho nominální otáčky, respektive rozsah, v rámci kterého budou řízeny.

Do výpočtu vstupuje několik hodnot – rozměr pneumatik z TP (viz Obr. 2) a poměry jednotlivých převodových stupňů.

Vzhledem ke skutečnosti, že vozidlo bylo provozováno na pozemních komunikacích, lze předpokládat, že byly použity pneumatiky v předepsaném rozměru, tj. 185/60 R15. První číslo zde udává šířku pneumatiky v milimetrech a není relevantní. Druhé číslo je tzv. profil, je zadán v procentech šířky pneumatiky a udává vzdálenost od ráfku k běhounu pneumatiky. Označení R15 udává průměr pneumatiky v palcích. Kombinací těchto hodnot lze jednoduše vypočítat průměr a obvod kola:

$$d_{\text{kolo}} = 15 \cdot 25,4 + 185 \cdot 0,6 \cdot 2 = 603 \text{ mm}$$

$$o_{\text{kolo}} = \pi \cdot d_{\text{kolo}} = 1\,894 \text{ mm}$$

Spojením stálého převodu (4,11:1) a převodů jednotlivých stupňů lze vypočítat celkový poměr otáček motoru k otáčkám kol:

1. stupeň	14,57:1
2. stupeň	7,830:1
3. stupeň	5,384:1
4. stupeň	3,983:1
5. stupeň	3,161:1
R (zpátečka)	13,36:1.

Jak již bylo zmíněno, dosahování vysokých rychlostí není z bezpečnostních důvodů žádoucí; primárně bude využíván první převodový stupeň, případně druhý při jízdě mimo náročný terén. Důležitým rozhodnutím je, na kterém převodovém stupni má požadované rychlosti (majitelem stanovené na hodnotu 10 km/h) být dosaženo – pokud by tomu bylo například při zařazeném druhém stupni, bylo by v terénu možno pro zvýšení „síly“ (tj. krouticího momentu) využít první stupeň, avšak za cenu snížení rychlosti vozidla. Z tohoto důvodu tedy bude následující výpočet proveden pro dosažení požadované rychlosti při zařazeném druhém převodovém stupni. Cílem výpočtu je určení jmenovitých otáček motoru; nelze však jednoznačně rozhodnout, jestli jsou nižší otáčky lepší nebo horší. Dovolím si tvrdit, že vyšší otáčky (řekněme

nad $1\,000\text{ min}^{-1}$) budou v této aplikaci vhodnější, neboť poskytují větší rozsah („prostor“) pro regulaci, motor je efektivněji chlazen a původní převodovka vozidla byla na tyto hodnoty dimenzována. Otáčky lze stanovit ze vztahu:

$$\text{RPM}_1 = \frac{v}{\frac{3,6}{o_{\text{kolo}}}} \cdot n_2 \cdot 60 \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

kde v je požadovaná rychlost (km/h),

o_{kolo} je obvod kola (m),

n_2 je celkový převod druhého stupně (-),

po dosazení

$$\text{RPM}_1 = \frac{10}{\frac{3,6}{1,894}} \cdot 7,83 \cdot 60 \doteq 690 \text{ min}^{-1}.$$

Vypočtené otáčky jsou dle mého názoru poněkud nízké. Z tohoto důvodu doporučuji přidání dalšího převodu (s poměrem např. 2:1, případně větším) přímo mezi elektromotor a vstupní hřídel převodovky, čímž by rychlosti 10 km/h bylo se zařazeným druhým převodovým stupněm dosaženo při otáčkách motoru $1\,380\text{ min}^{-1}$. Prakticky by se pravděpodobně jednalo o ozubená kola vhodných rozměrů spojená pomocí dostatečně silného řetězu nebo řemenu. Pro úplnost následuje přehled rychlostí vozidla, kterých by bylo na jednotlivých stupních (a s přidaným primárním převodem 2:1) dosaženo při těchto otáčkách:

1. stupeň	5,38 km/h
2. stupeň	10,0 km/h
3. stupeň	14,6 km/h
4. stupeň	19,7 km/h
5. stupeň	24,8 km/h
R (zpátečka)	5,9 km/h.

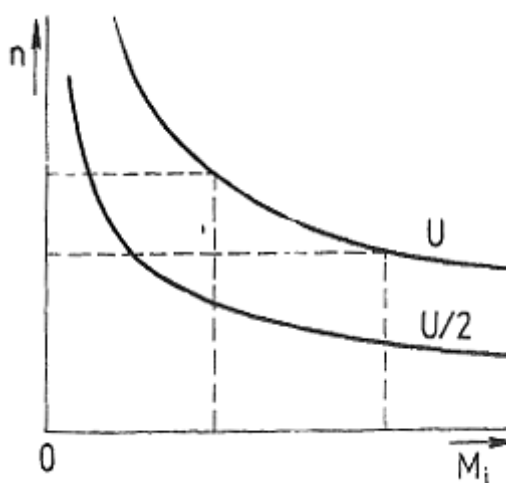
4 Přestavba

V této kapitole budou popsány některé z použitelných technologií motorů (a jim odpovídající způsoby regulace otáček), vhodné technologie akumulátorů a ostatní elektronické systémy potřebné ke spolehlivému provozu přestavovaného vozidla.

4.1 Stejnosměrné motory

První variantou je použití stejnosměrného (DC) motoru. V minulosti se jednalo o převažující technologii používanou zejména v trakčních aplikacích – konkrétně v Praze například soupravy metra typu 81-71 obsluhující linky A a B stále využívají cize buzené stejnosměrné motory [7] a dosluhující tramvaje typu T3 využívaly čtyřpólové sériové stejnosměrné motory [8]. Mezi hlavní důvody jejich popularity lze zařadit zejména širokou a plynulou regulaci rychlosti a v případě sériově zapojených motorů rovněž i „nenahraditelnou“ trakční mechanickou charakteristiku, tj. závislost úhlové rychlosti na elektromagnetickém momentu (viz Obr. 7). V dnešní době se stejnosměrné motory využívají například jako startéry a alternátory ve vozidlech a jako univerzální motorky v menších spotřebičích a nářadí. Speciální variantou jsou stejnosměrné motory s permanentními magnety a také BLDC motory, které budou zmíněny později.

Mezi nevýhody lze zařadit nutnost zvláštního zdroje napětí pro buzení (v případě cize buzeného motoru) nebo složitější rekuperaci a nemožnost provozu sériového motoru bez zátěže. Společnou nevýhodou všech tradičních („*brushed*“) stejnosměrných motorů je použití komutátoru a kartáčů (uhlíků), které jsou bezesporu nejvíce namáhanou částí stroje.

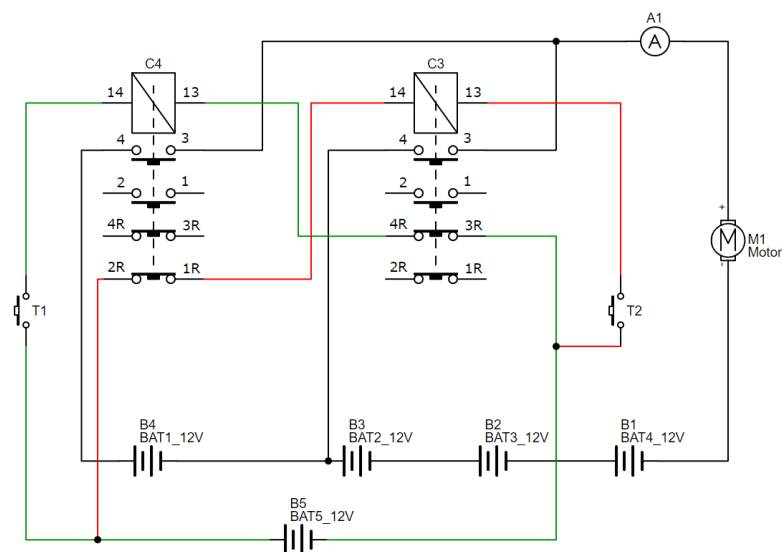


Obr. 7 – Mechanická charakteristika sériového SS motoru (zdroj: Elektromechanické měniče [9], s. 43)

Sériový stejnosměrný motor využívá pouze jeden obvod – jak napovídá název, vinutí statoru a rotoru jsou zapojena v sérii a protéká jimi shodný proud. Tento proud ve statoru budí magnetický tok, který je při rozběhu velký a tím způsobí silné magnetické pole a velký záběrný moment. U PMDC („*permanent magnet DC motor*“) motoru lze vinutí statoru nahradit permanentními magnety, takový stroj pak vykazuje vlastnosti stejnosměrného cize buzeného motoru. Vzájemným působením statického statorového toku a proudu procházejícího rotorem (resp. jím vyvolaného magnetického pole) působí na vodiče rotoru Lorentzova síla a rotor se otáčí. Komutátor zajišťuje stálou prostorovou polohu magnetického pole vytvořeného rotorem (kolmou k budicímu poli) pravidelným přepínáním napájených rotorových cívek, důsledkem je střídavý charakter rotorového proudu.

Rozběh je možný dvěma základními způsoby – regulací napájecího napětí, případně připojením na plné napětí a následnou regulací proudu kotvy, je-li to konstrukčně možné (nelze u sériového motoru, u nějž je rotorový proud zároveň proudem budicím). Primitivním způsobem proudové regulace je odporový rozběh, například spojitě pomocí reostatu (nebo nespojitě pomocí několika rezistorů různých odporů), který je však z principu ztrátový. Za jednoduchý způsob napěťové regulace, použitelný pro účel přestavby, lze považovat postupné přepínání napájecího napětí přímo u baterií. Vzhledem k faktu, že v obvodu lze očekávat velké proudy, je toto přepínání nezbytné provést pomocí vhodných zařízení – například silových stykačů¹ na stejnosměrný proud.

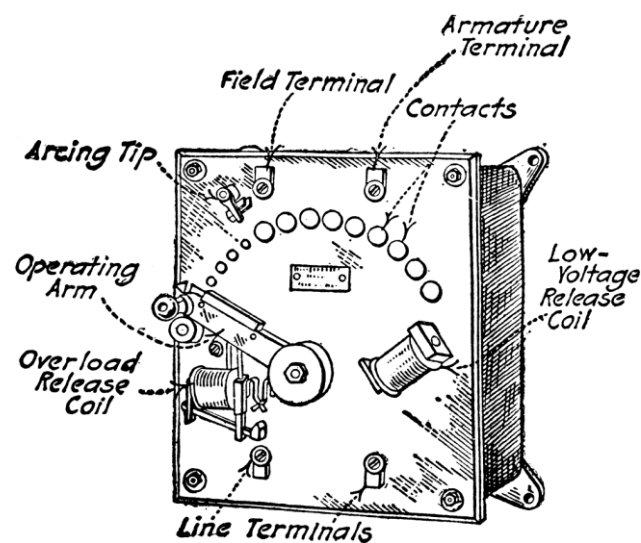
Příklad zapojení je na Obr. 8 – jedná se o napájení motoru napětím 48 V ve čtyřech stupních dle počtu připojených baterií. Řídící obvody (zeleně a červeně) jsou naznačeny pouze pro napětí 48 V a 36 V, analogicky by byly zapojeny u zbývajících větví (tj. napětí 24 V a 12 V).



Obr. 8 – Schéma zapojení přepínání napětí

¹ obecně je zde myšlen kontaktor, tj. výkonové relé, vakuový stykač apod.

Ze schématu je patrné, že pro napájení řídicích obvodů je použita samostatná baterie. Napájení cívky stykače C4 je po stisku tlačítka T1 vedeno přes NO („normally open“, tj. v beznapěťovém stavu rozpojený) pomocný kontakt stykače vedlejší napěťové hladiny (v tomto případě stykače C3 příslušící hladině 36 V) – jedná se o blokadu současného sepnutí stykačů C4 a C3. Tento postup není nezbytně nutný, neboť značně komplikuje celé zapojení (např. napájecí obvod cívky stykače C3 by musel být zapojen přes NO kontakty stykačů C4 i C2, tj. obou vedlejších napěťových hladin), v rámci návrhu je však nezbytné jej uvažovat. Pokud by spínání stykačů bylo realizováno např. úpravou plynového pedálu vozidla (podobně jako u reostatu – viz Obr. 9, tj. jeden pohyblivý kontakt na pedálu a vícero kontaktů pevných), teoreticky by mohlo v „mezipoloze“ dojít k současnému sepnutí dvou vedlejších stykačů, čímž by došlo ke zkratování baterie; toto riziko by bylo možné eliminovat vhodným provedením kontaktů. Alternativou by bylo použití původního plynového pedálu s lankem v kombinaci např. s lineárním potenciometrem, jehož polohu by vyhodnocoval vhodně naprogramovaný mikroprocesor (např. populární Arduino), který by pravděpodobně spínal slaboproudá relé, a ta dále silové stykače hlavního obvodu.



Obr. 9 – Rozběhový reostat (zdroj: Educational Technology Clearinghouse)

Očividnou nevýhodou této metody je velké množství použitých výkonových stykačů na velké proudy, které je přímo úměrné počtu napěťových hladin, a s ním související složitost zapojení. Řízení napětí navíc není spojitě a proud v obvodu je po sepnutí stykače omezen pouze odporem (a indukčností, obecně tedy impedancí) vinutí a přívodů; po počátečním přechodném ději proud indukčností omezován není a bylo by nutné použít odpor.

Další možnou metodou řízení otáček, hodnou 21. století, je polovodičový DC-DC měnič. Kombinuje několik výhod – spojité řízení napájecího napětí od nuly po jmenovité, jednodušší zapojení (menší počet komponentů a z něj vyplývající úspora místa) a obvykle i programovatelné parametry (omezení proudu, rozběhové rampy apod.). Standardním způsobem řízení napětí je pulzně-šířková modulace („PWM“) s frekvencí spínání řádově kHz, kdy výstupní napětí je přímo úměrné střídě („*duty cycle*“) spínaného signálu; výstupní napětí takového jednoduchého měniče je z principu vždy nižší než vstupní.

DC-DC měniče (resp. *controllery*, tj. zařízení přímo určená pro řízení stejnosměrných motorů) jsou dostupné, ačkoliv v ČR nejsou, v porovnání s frekvenčními měniči, zcela běžné. Pro variantu přestavby se sériovým stejnosměrným motorem navrhuji použití měniče Alltrax SR-72400 [10]. Pokud by bylo nutné regulátor zakoupit v ČR, navrhuji produkt H2 italského výrobce ZTP [11] (v ČR dostupné např. u spol. UHS Jakos, a.s. [12]). Nejlevnější možnou variantu představuje kontrolér Kelly KDZ (72 V, 400 A) za 299 \$ [13].



Obr. 10 – Controller Alltrax SR-48400 (zdroj: Alltrax, Inc; alltraxinc.com)

Měnič Alltrax je vyráběn v několika verzích, které se liší použitelným napětím a maximálním provozním proudem. Zvolená verze (72400) je určena pro napětí 72 V a dimenzována je na trvalý proud 270 A (a až 460 A špičkově) [14]. Zapojení vyžaduje pouze jeden solenoid (stykač) a není příliš komplikované (viz Příloha 6).

Další použitelný kontrolér je PowerpaK od britského výrobce Sevcon [15]. Výrobce dodává velké množství variant; z manuálu [16] lze vyčíst, že použitelný model nese označení PP286M, a že při zvláštním zapojení umožňuje regenerativní brzdění (viz Příloha 8), což

v principu znamená, že část brzděné energie je dodávána zpět do baterií a tím je mírně zvýšen dojezd vozidla. U sériových motorů se regenerace (rekuperace) v minulosti běžně nepoužívala, neboť vyžaduje použití polovodičových prvků. Obecně není použití rekuperace u sériových motorů ani v současnosti vhodné, zejména kvůli vyššímu opotřebení kartáčů a komutátoru při přechodu motoru do generátorového chodu. Výhodou tohoto kontroléru je malá velikost (a nižší hmotnost), nevýhodou vyšší cena a nutnost prvotní kalibrace pomocí speciálního přístroje, který je prodáván samostatně.

Problematická část stejnosměrné varianty je samotný motor. Jak bylo zmíněno, stejnosměrné motory se dříve těšily velké oblibě; v současné době je však prakticky ve všech aplikacích nahradily motory na střídavé napětí řízené polovodičovými měniči. Nabídka na trhu nových motorů je relativně malá (pominu-li individuální výrobu na míru), a ani koncovými uživateli prodávané použité stroje obvykle nebývají stejnosměrné – přímé připojení střídavého motoru na 230/400 V AC je v drtivé většině aplikací pohodlnější.

Vzhledem k vysoké hmotnosti je žádoucí motor zakoupit v ČR, neboť doprava např. z USA by pravděpodobně byla dražší než samotný motor; toto samozřejmě platí pro jakýkoliv motor, nejen pro stejnosměrný. Z českých prodejců opět zmíním spol. UHS Jakos, která má v nabídce stejnosměrné trakční motory italského výrobce Best Motor, s.r.l. a německého výrobce Schabmüller GmbH [17]. Použitelný motor italského výrobce nese označení F1803100 a při 80 V a 115 A poskytuje výkon 8 000 W (2 450 ot./min); při napětí 72 V lze očekávat výkon mírně nižší. Technický nákres zobrazuje Příloha 7.

Druhým kandidátem je motor Warp 9 amerického výrobce NetGain, Inc. Jedná se o sériový motor s významně vyšším výkonem – při 72 V a 335 A (2 158 ot./min) produkuje 32 koňských sil, tj. zhruba 24 kW; krouticí moment je při těchto hodnotách 70 lb×ft, tj. zhruba 95 Nm [18]. Motor takovýchto parametrů je pro účel přestavby dle mého názoru předimenzovaný – snížením otáček při maximálním výkonu na polovinu (viz výpočet v kapitole 3.2), tzn. cca 1 000 ot./min, by byl krouticí moment zdvojnásoben, a byl by dokonce větší než maximální moment původního spalovacího motoru. S měničem Alltrax by navíc nemohl být trvale provozován při velkém výkonu. Nevýhodné rovněž je, že motor má hřídel z obou stran („*double sided shaft*“ [19]), což motor předurčuje pro přímý pohon poloos („*direct drive*“) spíše než pro instalaci s původní převodovkou. Velký výkon je promítnut do vysoké pořizovací ceny – 2 074 \$ [18].



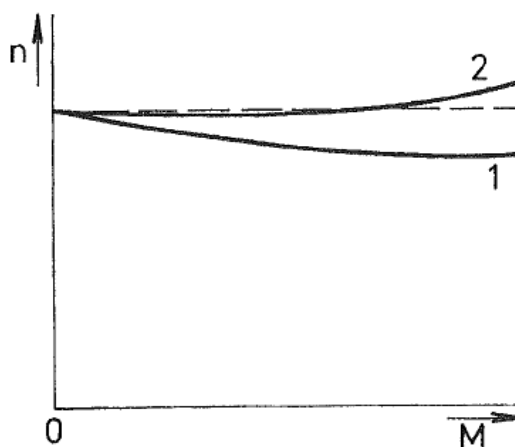
Obr. 11 – Motor Warp 9 (zdroj: EVWest.com)

Třetí použitelný motor je model ES-15A-6 amerického výrobce D&D. Jedná se o sériový motor o trvalém výkonu 9 koňských sil (cca 6,7 kW; špičkově až 25 koňských sil, tj. cca 19 kW a cca 88 Nm) při 72 V. Trvalý výkon se může zdát nízký, výhodou sériových stejnosměrných motorů je však jejich velká přetížitelnost, což dokládá i dvojnásobný špičkový výkon; pro účely přestavby by tento motor měl být dostačující. Nižší výkon částečně kompenzuje nízká hmotnost (62 liber, tj. cca 28 kg), jednostranná hřídel a nižší cena – 750 \$ [20].



Obr. 12 – Motor D&D ES-15A-6 (zdroj: EVDrives.com)

Pro přestavbu mohou samozřejmě být použity i stejnosměrné motory cize buzené, v anglické literatuře označované jako SEM („*separately excited motor*“) nebo SepEx. Zásadní rozdíl oproti sériovému motoru je nutnost samostatného buzení, přičemž stroj musí před spuštěním být plně nabuzen, aby měl velký záběrný moment při nízkém záběrném proudu kotvy. Motor má tzv. tvrdou mechanickou charakteristiku – oproti sériovému motoru s rostoucím momentem otáčky klesají méně (viz Obr. 13). Moment se s rostoucím proudem zvětšuje lineárně (do nasycení magnetického obvodu, poté roste pomaleji), narozdíl od parabolického průběhu sériového stroje, který po nasycení přechází v přímku [9].

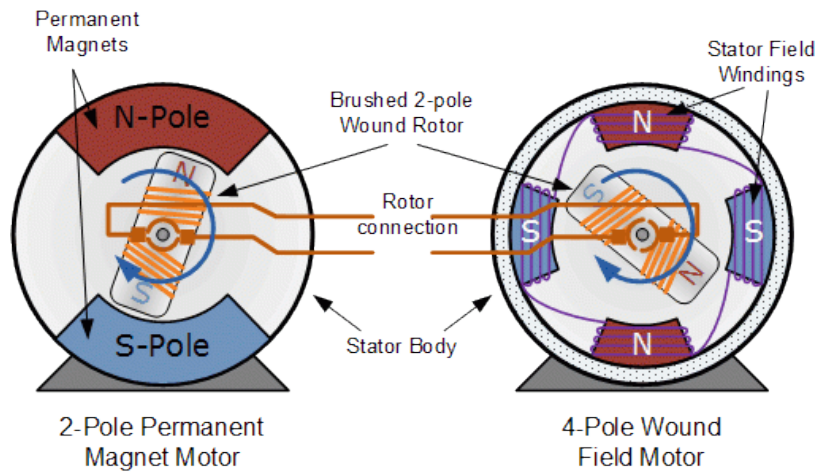


Obr. 13 – Mechanická charakteristika cize buzeného motoru (zdroj: *Elektromechanické měniče* [9], s. 38)

Potřeba zvláštního budicího zdroje byla v minulosti větší překážkou než dnes, kdy jej lze zakomponovat do jednoho polovodičového kontroléru. Výše zmíněný britský výrobce Sevcon nabízí kontrolér Gen4 DC, jehož 550 A (72 V) verze je schopna dodávat trvalý budicí proud 50 A a trvalý kotevní proud 170 A [21]. Motor lze řídit podle momentu nebo podle rychlosti s možností dalšího zvyšování rychlosti odbuzováním. Samozřejmostí je čtyřkvadrantové řízení, tj. schopnost ovládat motor v obou smyslech momentu i otáček, které přináší výhodu rekuperace. Cize buzený motor může energii rekuperovat třemi způsoby – zvýšením rychlosti nad rychlost naprázdno (např. při jízdě z kopce), snížením napájecího napětí kotvy nebo zvýšením budicího proudu; všechny způsoby vyvolávají obrácení smyslu momentu a zvýšení indukovaného napětí na kotvě nad napětí napájecí.

Speciální variantou cize buzených stejnosměrných motorů jsou PMDC motory, které, jak již bylo zmíněno, jako zdroj magnetomotorického napětí používají permanentní magnety. Používají se spíše v aplikacích nenáročných na výkon, kde s využitím silných magnetů ze vzácných zemin (SaCo, NdFeB) postačuje slabší neřiditelný magnetický tok. Výhoda (a zároveň i hlavní nevýhoda) tohoto přístupu je zřejmá – není nutné dodávat budicí proud, buzení

však nelze snadno regulovat. Schematický rozdíl mezi PMDC a „obyčejným“ stejnosměrným motorem s vinutým státorem zobrazuje Obr. 14.



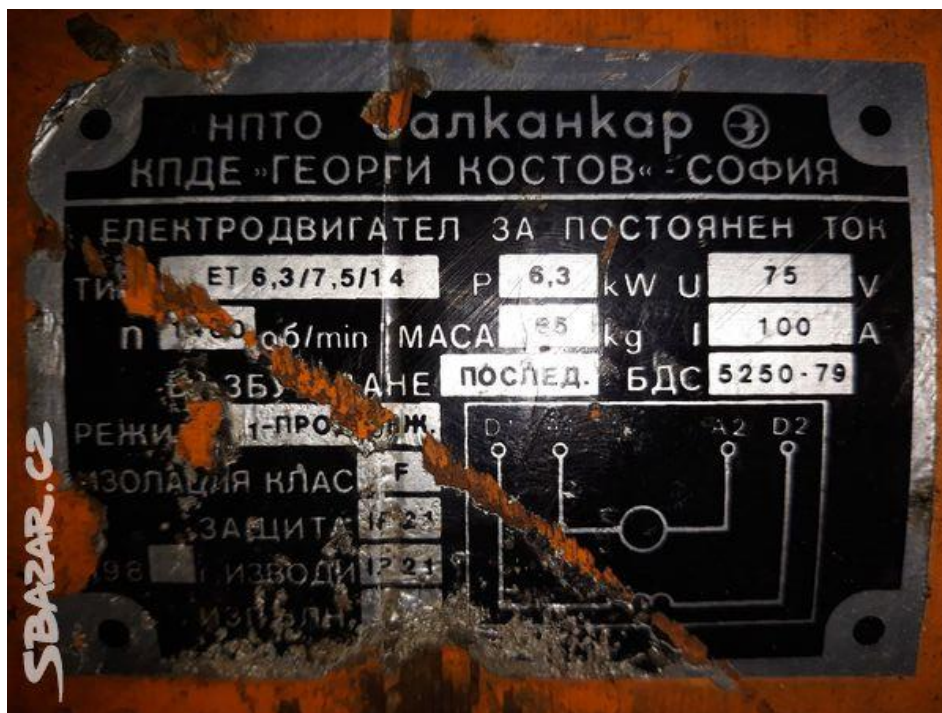
Obr. 14 – Dvoupólový PMDC motor vs. standardní čtyřpólový motor (zdroj: electronics-tutorials.ws)

Jako zástupce této technologie, použitelný pro přestavbu, lze uvést např. motor ME1003 amerického výrobce Motenergy: při 72 V a 200 A (až 400 A špičkově) poskytuje výkon 11,5 kW (23 kW špičkově; 3 700 ot./min naprázdno). S hmotností 39 lb (tj. pouhých 17,7 kg), cenou 680 \$ [22] a kompaktními rozměry (viz Příloha 9) se bezesporu jedná o zajímavého adepta.



Obr. 15 – Motor Motenergy ME1003 (zdroj: electricmotorsport.com)

Poslední (a o něco více „bastlířskou“) variantou je použití motoru z druhé ruky. Nestává se tak příliš často, ale při vytrvalejším shánění lze v bazarech a inzercích objevit motory vhodných parametrů. Dříve používaná elektrická vozidla, jako například vysokozdvížné vozíky nebo plošinové vozíky (dodnes k vidění např. na nádražích), využívala motory použitelné pro účel přestavby. Při koupi vozidla na náhradní díly lze rovněž použít trakční baterie. Jako zástupce této varianty (dostupný v době psaní této práce) lze uvést motor z VZV Balkancar EV 717, jehož elektromotor (typ ET6,3/7,5/14) má při 75 V a 100 A výkon 6,3 kW, viz Obr. 16. Výhodou varianty se starším motorem je samozřejmě finanční úspora (prodejce uvádí cenu dohodu, osobně odhaduji cca 5 000 Kč) [23]; u tohoto konkrétního motoru navíc vícero možných způsobů zapojení vinutí – sériové nebo cizí buzení, teoreticky i derivační. Nevýhodou je naopak vyšší hmotnost (85 kg).



Obr. 16 – Štítek motoru z VZV Balkancar (zdroj: sbazar.cz)

4.2 Střídavé motory

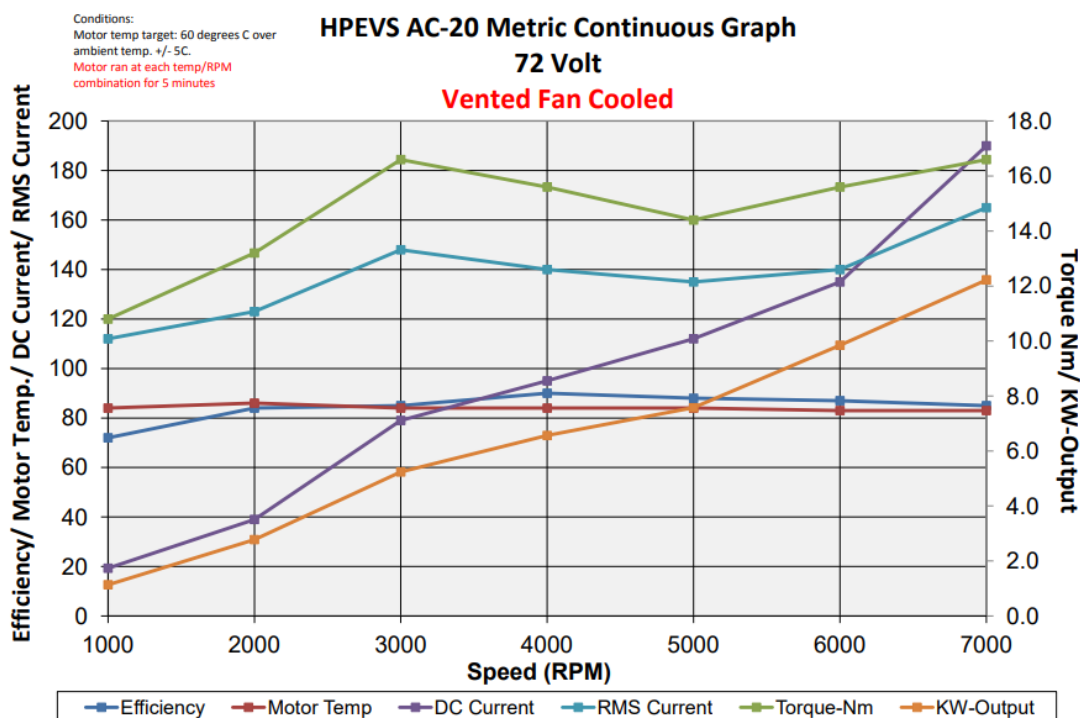
Druhou kategorií motorů, ze kterých lze při přestavbě vybírat, jsou střídavé (AC) motory. Na první pohled se použití motorů na střídavý proud při napájení z bateriového systému může jevit jako neproveditelné – a v minulosti tomu tak skutečně bylo – nicméně v současné době je řízení pomocí výkonových polovodičových prvků prakticky totožné s řízením motorů stejnosměrných. Drtivá většina komerčně vyráběných elektromobilů využívá pro svůj pohon právě AC motory, zejména kvůli vybraným vlastnostem, které stejnosměrné motory nemají. Jmenovat lze vysokou účinnost motoru, nízké nároky na údržbu, vysoký výkon, pokročilejší metody řízení nebo efektivní a jednoduchou rekuperaci.

Prvním zástupcem střídavých strojů je asynchronní motor. Ve standardním použití se jedná o nejběžnější typ motoru, neboť pro svůj provoz nevyžaduje žádné další přístroje; s výjimkou strojů velkých výkonů, které používají tzv. „softstartér“, je lze spouštět přímým připojením na síť. Jedná-li se o trojfázový motor s kotvou nakrátko, točivé magnetické pole statoru je zaručeno principiálně; samotné otáčení rotoru způsobuje magnetické pole vytvořené proudem do něj indukovaným. Indukce do rotoru (odtud také název „*induction motor*“) je možná pouze v případě, že frekvence statorového pole je vyšší než rychlost otáčení rotoru. Právě změna frekvence je běžný způsob řízení asynchronních motorů (pozorovat jej lze například v pražském metru na lince C, kde jsou vozy vybaveny asynchronními motory [7], které při rozjezdu soupravy vydávají typický zvuk se stoupající frekvencí). Nevýhodou (oproti synchronním motorům) je přítomnost ztrát skluzem (vyplývající z principu funkce, tj. indukce do rotoru) a tím pádem i nižší účinnost, nebo vysoký záběrný proud při spouštění [24].

Pro účel přestavby je asynchronní motor problematický v případě, že je systém navrhován na nízké napětí, neboť tyto motory se na trhu objevují spíše výjimečně; drtivá většina je navržena na síťové napětí 230/400 V. Použití takového motoru je sice teoreticky možné (v zapojení s invertorem, transformátorem a frekvenčním měničem), prakticky ale smysl nedává. Pro vysokonapěťové aplikace jsou v elektromobilech asynchronní motory používány běžně – např. známý elektromobil Tesla Model S (ročník 2012, verze Performance) je poháněn čtyřpólovým trojfázovým asynchronním motorem o výkonu 310 kW (a momentem 600 Nm) na napětí 375 V [25]. Systém využívající toto napětí nelze v „domácích“ podmínkách bezpečně zapojit a provozovat; cílem je navrhnout systém s napětím např. 72 V, pro které byly vybírány i stejnosměrné motory v předchozí části.

Použitelný (i když svými parametry ne zcela optimální) asynchronní motor je HPEVS AC-20, který lze provozovat v rozmezí napětí od 72 V do 130 V. Teoreticky motor lze použít – při 6 000 ot./min a stejnosměrném proudu (z baterií) cca 140 A poskytuje výkon 10 kW

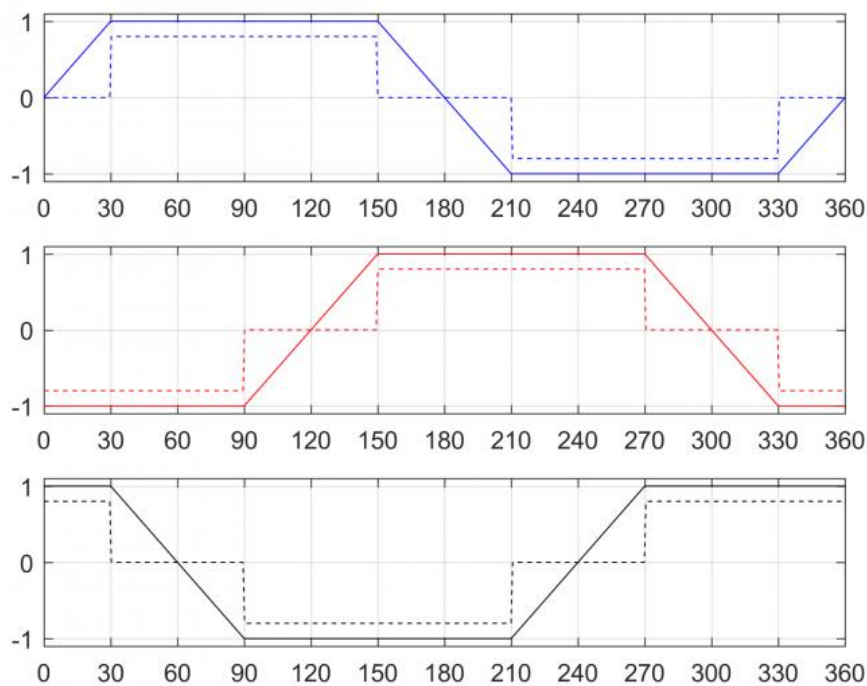
(a špičkově až 40 kW při 680 A) [26], což je dostačující. Grafické zobrazení výkonu, proudu a dalších veličin poskytuje Obr. 17. Nevýhodou jsou nejen pro potřebný výkon vysoké otáčky, které odpovídají horní hranici rozsahu otáček spalovacího motoru a převodový systém na ně není (dlouhodoběji) dimenzován, ale i nevyužitý výkon vyplývající z použití napájecího napětí 72 V, tj. spodní hranice rozsahu použitelných napětí. Tento nevyužitý výkon je promítnut do ceny (3 125 \$), kterou dále zvyšuje i fakt, že motor je prodáván společně s kontrolérem jako sada [27].



Obr. 17 – Graf výkonu, krouticího momentu, proudu aj. motoru HPEVS AC-20 (zdroj: hpevs.com)

Pro řízení asynchronních motorů těchto parametrů, pokud by byly k dispozici samostatně, je možné použít například kontroléry amerického výrobce Curtis. Nejvyšší verzi podporující napětí 72 V je model 1236SE-652X, který je schopen dodávat proud 450 A (RMS) po dobu dvou minut, resp. 185 A (RMS) po dobu šedesáti minut [28]. Výrobce neuvádí, jakým způsobem je motor řízen; v datasheetu je však uvedeno „*Field Oriented Control (FOC) algorithms generate the maximum possible torque and efficiency across the entire speed range. Advanced Curtis control provides superb drive ‘feel’, improved speed regulation and increased gradeability.*“ [28], z čehož lze předpokládat, že se jedná o jistý způsob vektorově orientované regulace (velmi zjednodušeně jde o rozklad fázových proudů na „tokotvornou“ a „momentotvornou“ složku). Pro správnou funkčnost řízení je nutné, aby byl v kontroléru vytvořen matematický model konkrétního motoru; toto lze provést automatickým laděním, jímž je kontrolér vybaven.

Dalším kandidátem je BLDC („brushless direct current“), nazývaný taktéž EC („electronically commutated“) nebo synchronní DC motor. Od „standardního“ synchronního (označovaného PMAC nebo PMSM – „permanent magnet synchronous motor“) motoru se liší² pouze způsobem napájení – vstupní napětí není sinusové, viz Obr. 18. Z historického hlediska se jedná o nejmladší technologii, která s rozšiřováním polovodičových měničů postupně nachází uplatnění ve stále větším množství aplikací. Výhodami jsou mj. vysoká účinnost, nízká hmotnost (resp. vysoká výkonová hustota, tj. poměr výkonu a hmotnosti), nízké nároky na údržbu, výborná škálovatelnost výkonu a krouticího momentu (od velmi malých, např. větráčky v elektronice, až po velké trakční motory s výkonem v řádu desítek kW) nebo plynulé a přesné řízení. Mezi nevýhody lze do jisté míry zařadit vyšší cenu, vyplývající zejména z použití permanentních magnetů ze vzácných zemin, a náročnější řízení, které je v dnešní době obdobné jako u asynchronních motorů, vyžaduje však použití senzorů a zpětnovazebných obvodů.



Obr. 18 – Napájecí napětí (plně) a fázový proud (čárkovaně) tří fází BLDC motoru jako funkce el. úhlu (zdroj: anttilehikoinen.fi)

Jako vhodný zástupce této kategorie se jeví motor Motenergy ME1114. Jedná se o čtyřpólový vzduchem chlazený PMSM s výkonem 10 kW (až 24 kW špičkově) při napětí 72 V a fázovém proudu 125 A (≈ 180 A stejnosměrných). Vinutí statorů je zapojeno do hvězdy

² PMSM jsou často označovány jako BLDC a naopak

a každá fáze má 20 závitů. Výrobce udává hmotnost 13 kg (29 lb) a účinnost 92 % [29], vzájemná poloha rotoru vůči statoru je kontroléru sdělována sin/cos senzorem (zjednodušeně – induktivní metodou jsou vysílány dva vzájemně posunuté sinusové průběhy, jejichž rozdíl je vyhodnocován – metoda je značně odolná vůči rušení [30]). Schematický náčrt zobrazuje Příloha 10; Příloha 11 zobrazuje graf závislosti výkonu, účinnosti, otáček, proudu a napájecího napětí na zátěžném momentu. Z tohoto grafu lze zjistit, že např. při zátěžném momentu cca 18 Nm je odebíraný proud 140 A, dodávaný výkon cca 7 600 W a otáčky 4 000 min⁻¹ – moment se zdá být nízký, ale při snížení otáček převodem např. na čtvrtinu by byl dostatečný; výrobce uvádí maximální moment 65 Nm.



Obr. 19 – Motor Motenergy ME1114 (zdroj: electricmotorsport.com)

Druhým zástupcem je motor čínského výrobce Golden Motor s označením HPM-10KW (případně HPM72-10000). Jak název napovídá, jedná se o motor s výkonem 10 kW (při jmenovitých hodnotách 72 V, 160 A a 3 500 ot./min) a je označován jako BLDC motor; hmotnost činí 17 kg [31]. U tohoto motoru bych se osobně obával poddimenzovaného chlazení (viz Obr. 20); kromě vzduchového chlazení ale výrobce nabízí i kapalinou chlazenou verzi, jejíž použití by sice prodloužilo životnost motoru, značně by však zkomplikovalo celý systém zapojení a vyžadovalo by použití dalších komponent. Dle naměřených dat (grafickou reprezentaci poskytuje Příloha 12) poskytnutých výrobcem motor disponuje účinností až 93,5 % (v bodě

maximální účinnosti při napětí 71,38 V, proudu 81,549 A a momentu 12,428 Nm dosahuje 5 440 ot./min [32]), a jeví se tak jako vhodný adept pro přestavbu.



Obr. 20 – BLDC motor HPM-10KW (zdroj: goldenmotor.com)

K řízení BLDC nebo PMSM je nutné použití kontroléru (tj. „chytrého“ invertoru) a čidla polohy (enkodéru), které řídicí jednotce udává aktuální polohu rotoru vůči statoru. Univerzální kontrolér, schopný přijímat signály z UVW enkodéru (na principu Hallových sond, pro řízení BLDC motorů), sin/cos enkodéru, případně inkrementálního AB enkodéru (který však indikuje pouze pohyb a jeho směr, nikoliv absolutní pozici rotoru), je dříve zmiňovaný Sevcon Gen4, tentokrát verze bez označení „DC“. Výrobce jej pro napětí 72 V dodává ve třech velikostech dle provozního proudu – verze („Size“) 2 pro trvalý proud 75 A, Size 4 pro 140 A a Size 6 pro proud 220 A [33]. Například v kombinaci s motorem Motenergy ME1114 by pravděpodobně pro maximální využití dostupného výkonu bylo nutné použít nejvyšší verzi (Size 6), s motorem HPM-10KW bych doporučil spíše střední verzi (Size 4) – snížením proudu z kontroléru by na úkor výkonu byla prodloužena životnost motoru.

4.3 Technologie akumulátorů

Po výčtu použitelných technologií motorů a způsobu jejich řízení je na řadě část elektromobilu, která dle mého názoru v současnosti stále brání jejich masovému rozšíření – akumulátory. Elektromotory jsou dlouho známá a vyspělá technologie, lze je prakticky libovolně škálovat pro konkrétní aplikace, a speciálně pro elektromobily se jedná o součást poměrně malou a lehkou. Na druhé straně je způsob dodávání energie do těchto motorů, resp. její dlouhodobější skladování, kde „ušetřenou“ hmotnost spalovacího motoru v elektromobilu nahrazuje (a obvykle i převyšuje) hmotnost akumulátorů, které mají o několik řádů nižší energetickou hustotu než konvenční paliva, a to jak hmotnostní, tak objemovou [34]. V rámci této kapitoly budou popsány technologie použitelné pro napájení elektromotoru v přestavovaném voze – cílem je navrhnout systém s napětím 72 V, snahou je maximalizace kapacity akumulátorů a minimalizace jejich objemu, hmotnosti a samozřejmě i ceny.

Požadovanou kapacitu akumulátorů lze získat výpočtem z požadovaného dojezdu vozidla, který byl investorem stanoven na 20 km na jedno nabití. Bude-li elektromobil osazen např. střídavým BLDC motorem HPM72-10000 (a provozován v bodě maximálního momentu, tj. s výkonem 12,119 kW při 194 A a 3 779 ot./min dle dat výrobce, viz Příloha 12) a redukcí mezi motorem a převodovkou s poměrem 3:1, lze určit krouticí moment dodávaný motorem:

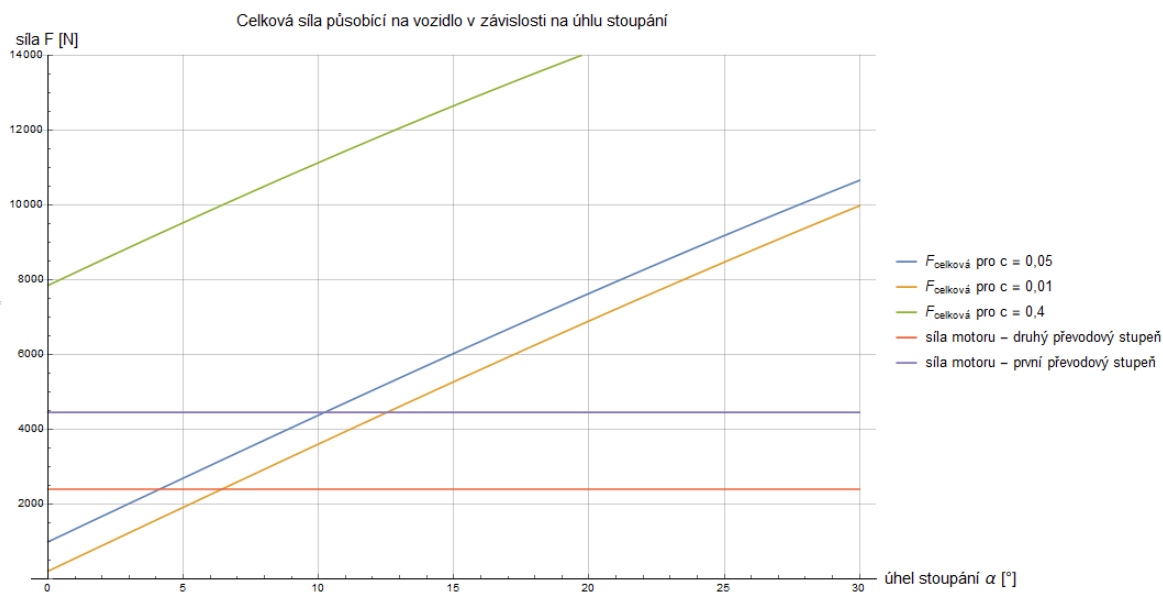
$$P = \frac{M \cdot 2\pi \cdot \omega}{60}$$
$$M = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot \omega} = \frac{60 \cdot 12119}{2\pi \cdot 1260} \doteq 92 \text{ Nm.}$$

Porovnáním síly působící na vozidlo (s převodem druhého stupně 7,83:1):

$$7,83 \cdot M = F \cdot r \rightarrow F = \frac{7,83 \cdot M}{\frac{d_{\text{kolo}}}{2}} = \frac{7,83 \cdot 82}{301,5 \cdot 10^{-3}} \doteq 2\,389 \text{ N}$$

a vypočtené síly $F_{\text{celková}} = 5\,037 \text{ N}$ (pro $c = 0,05$ a $\alpha = 12^\circ$) je patrné (nicméně nepřekvapující, viz výpočet požadovaného výkonu v úvodu práce), že s výše uvedenými

parametry nelze překonat 12° stoupání s hmotností vozu 2 000 kg – zpětným výpočtem lze získat úhel stoupání, který by vozidlo při tomto výkonu bylo schopno překonat – pro koeficient $c = 0,05$ a rychlosti pohybu 9,13 km/h na druhý převodový stupeň je to úhel cca 4° (viz Obr. 21). Tento úhel lze dle mého názoru považovat za reprezentativní průměr terénu, kterým se vozidlo bude pohybovat; pro další výpočty je uvažován výkon motoru 12 kW.

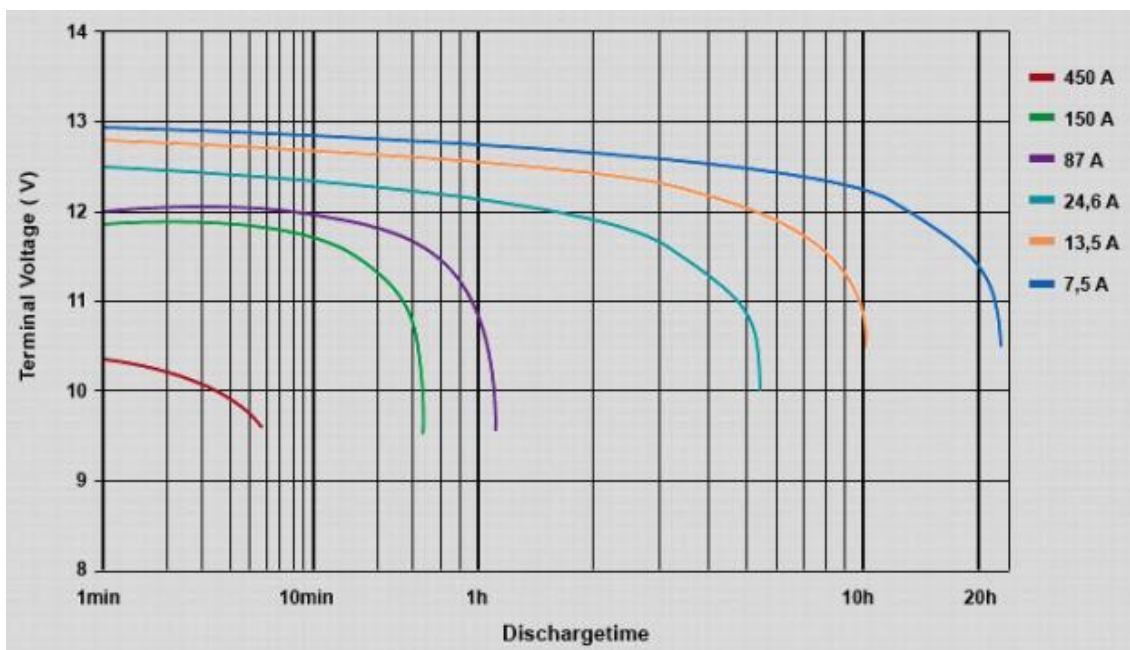


Obr. 21 – Graf síly v závislosti na koeficientu c se zobrazením síly dodávané motorem

Za těchto předpokladů (stoupání 4°, výkon 12 kW, rychlost 9,13 km/h) je na dosažení investorem požadovaného dojezdu 20 km potřeba energie zhruba 30 kWh (při účinnosti motoru 87,5 %), neboli kapacita akumulátorů 425 Ah při napětí 72 V. Obvykle se u elektromobilů udává spotřeba v kWh/100 km (případně Wh/km), zde je tato hodnota rovna 1 500 Wh/km. Pro srovnání: např. Hyundai Kona Electric (s kapacitou akumulátorů 39 kWh) má průměrnou spotřebu 154 Wh/km, Tesla Model 3 Long Range Dual Motor má spotřebu 158 Wh/km, BMW i3 (kapacita 120 Ah) má spotřebu 161 Wh/km a Škoda CITIGOe iV má udávanou spotřebu 162 Wh/km [35]. Výše vypočtenou kapacitu akumulátorů považuji za příliš velkou, a to z několika důvodů – nepředpokládám, že vozidlo s provozní hmotností 1 085 kg bude provozováno s celkovou hmotností 2 000 kg, dále není pravděpodobné, že bude neustále ve stoupání s potřebou výkonu 12 kW, a v neposlední řadě, bude-li použit vhodný typ motoru a kontroléru, lze část energie získat zpět rekuperačním brzděním. Také účinnost motoru je závislá na zatížení a může být vyšší než hodnota použitá ve výpočtu výše. S ohledem na hmotnost, velikost a cenu proto navrhuji instalaci akumulátorů s kapacitou okolo 150 Ah.

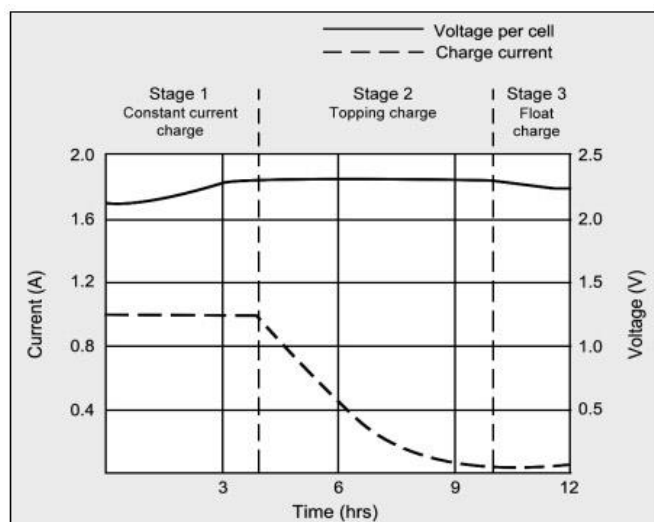
Nejstarší (vynalezenou v roce 1859 [36]), avšak stále populární technologii, jsou **olověné akumulátory**. Navzdory věku se stále jedná o nejdostupnější technologii, která v některých aplikacích dodnes nenalezla vhodnějšího nástupce. Značnou výhodou je robustní konstrukce, která snese „tvrdé“ zacházení, jako např. startování standardního spalovacího motoru, tedy krátkodobé zatížení s velkým dodávaným výkonem. Standardní akumulátor s napětím 12 V je složen z vícero článků, každý s napětím cca 2 V, v sérii jich je tedy zapojeno šest. V případě „obyčejného“ akumulátoru se zaplavenými elektrodami je prostor mezi elektrodami (záporná z olova, kladná z oxidu olovičitého) vyplněn tekutým elektrolytem – vodou ředěnou kyselinou sírovou, jejíž koncentrace se během používání zvyšuje a vodu je nutno doplňovat. Z praktických důvodů byly vyvinuty „bezúdržbové“ akumulátory, které jsou zcela uzavřené a vodu není nutné doplňovat (vzniká chemickou reakcí při dobíjení). Bezúdržbové akumulátory lze rozdělit na dva druhy – AGM („*absorbent glass mat*“, obsahuje elektrolyt „nasáklý“ ve skelné vatě) a VRLA („*valve-regulated lead acid*“, elektrolyt je ve formě gelu); oba poskytují výhodu vyšší odolnosti a provozuschopnosti v jakékoliv poloze (elektrolyt nelze vylít), jsou ale dražší než standardní akumulátory [36]. Pro účel přestavby lze doporučit použití dražších trakčních („*deep cycle*“) olověných akumulátorů, které mají robustnější elektrody, a jak anglický název napovídá, lépe snášejí hluboké vybití. Životnost akumulátoru závisí zejména na počtu a hloubce vybití (*DoD* – „*depth of discharge*“); s vyšší hloubkou vybití klesá maximální počet vybíjecích cyklů: pro 100% DoD lze očekávat cca 150-200 cyklů, pro 50% DoD 400-500 cyklů a pro 30% DoD přes 1 000 cyklů (hodnoty pro trakční akumulátor) [36]. Nevýhodou olověných akumulátorů je jejich vysoká hmotnost. Např. trakční akumulátor Varta Professional Dual Purpose (Deep cycle) s kapacitou 140 Ah (a samozřejmě napětím 12 V) váží 37 kg [37] – zapojením šesti těchto akumulátorů do série by ve vozidle bylo celkem 222 kg baterií (s kapacitou 140 Ah, tj. 10,08 kWh). Cena nového akumulátoru je cca 3 600 Kč a udávaná životnost je zhruba 200 cyklů při 50% DoD [37]. Obdobná varianta, Varta Professional Deep Cycle AGM, při kapacitě 150 Ah (resp. 123 Ah – měřeno pro pětihodinové vybíjení) váží v nenaplněném stavu, tedy bez vody, 46,7 kg [38]. Pro tuto variantu je výrobcem poskytnut i graf vybíjecích křivek, viz Obr. 22, ze kterého lze odhadovat, že pro vybíjecí proud např. 50 A (nepředpokládám, že by vozidlo bylo trvale provozováno na maximální výkon, hodnota je odhadnutý průměrný proud odebíraný motorem) by po hodině provozu bylo napětí akumulátoru stále okolo 12 V. Nevýhodou je zde více než dvojnásobná cena – 8 690 Kč s DPH za kus, výhodou vyšší udávaná životnost – zhruba 800 cyklů při 50% DoD [39].

Pokud by bylo nutné maximálně omezit investiční výdaje, lze použít i startovací olověné akumulátory, avšak za cenu značného omezení životnosti. Nejlevnější model je akumulátor značky BARS s kapacitou 44 Ah, hmotností 11 kg a cenou 997 Kč s DPH [40].



Obr. 22 – Graf závislosti napětí akumulátoru na čase pro různé vybíjecí proudy (zdroj: varta-automotive.cz)

Nabíjení olověných akumulátorů je pravděpodobně nejsnazší v rámci všech technologií. Běžný postup je nabíjení CC/CV („constant current / constant voltage“) metodou (viz Obr. 23), která, jak název napovídá, spočívá v rozdělení nabíjení na dvě fáze – v první fázi je nabíječkou udržován konstantní, vhodně velký proud, a to až do dosažení zvoleného napětí v rozsahu 13,80 V až 14,70 V (pro 12 V baterii obvykle 14,40 V); po této fázi je toto napětí udržováno a proud klesá. Po snížení proudu na minimum obvykle následuje ještě třetí, udržovací fáze, kdy je při nižším napětí dodáván minimální proud; tato fáze je důležitá pro zachování co možná nejvyšší kapacity baterií – omezuje sulfataci elektrod [41].



Stage 1: Voltage rises at constant current to V-peak. **Stage 2:** Current drops; full charge is reached when current levels off. **Stage 3:** Voltage is lowered to float charge level.

Obr. 23 – Graf napětí a proudu při nabíjení olověného článku CC/CV metodou (zdroj: batteryuniversity.com)

Výrobci olověných akumulátorů doporučují nabíjení proudem 0,3C, „zdravý“ akumulátor lze bez větších problémů nabíjet proudem až 1,5C (krátkodobě i vyšším, což je v rámci přestavby výhodné při využití rekuperačního brzdění). Velikost napětí během CV fáze lze rozdělit do dvou základních skupin – nižší (tj. 13,80 V až 14,10 V) a vyšší (14,40 V až 14,70 V), oba způsoby nabíjení mají svá pozitiva i negativa. Při volbě nižšího napětí může akumulátor mít delší životnost a zůstává při nabíjení chladný, nabíjení je však pomalejší, časem může docházet ke snižování kapacity a bez udržovací fáze může docházet ke zvýšené sulfataci elektrod. Nabíjení vyšším napětím maximalizuje využití dostupné kapacity a omezuje sulfataci, při přebíjení však může docházet k tvorbě plynů (vodíku a kyslíku) a u údržbových akumulátorů je nutné častěji dolévat vodu. Volba „správného“ napětí je rovněž teplotně závislá (nepřímo úměrně), moderní nabíječky jsou obvykle vybaveny senzorem a toto napětí regulují podle teploty okolí [41].

Použitelnou nabíječkou (nejen) olověných akumulátorů je např. Delta-Q QuiQ 1500. Nabíječku lze použít na standardní jednofázové síti 230 V (50 Hz), dobíjecí proud baterií je v případě 72 V verze 20 A. K dispozici je více než 190 nabíjecích profilů pro různé typy akumulátorů – zaplavené, AGM i gelové olověné, případně i lithiové [42]. S hmotností 5 kg lze nabíječku zakomponovat přímo do palubního systému. Pro kapacitu baterií 140 až 170 Ah je

uváděná doba nabíjení 7 – 8,5 hodin [43]. S ostatními částmi systému (např. s kontrolérem motoru) může nabíječka komunikovat pomocí rozhraní CAN.



Obr. 24 – Nabíječka Delta-Q QuiQ 1500 (zdroj: delta-q.com)

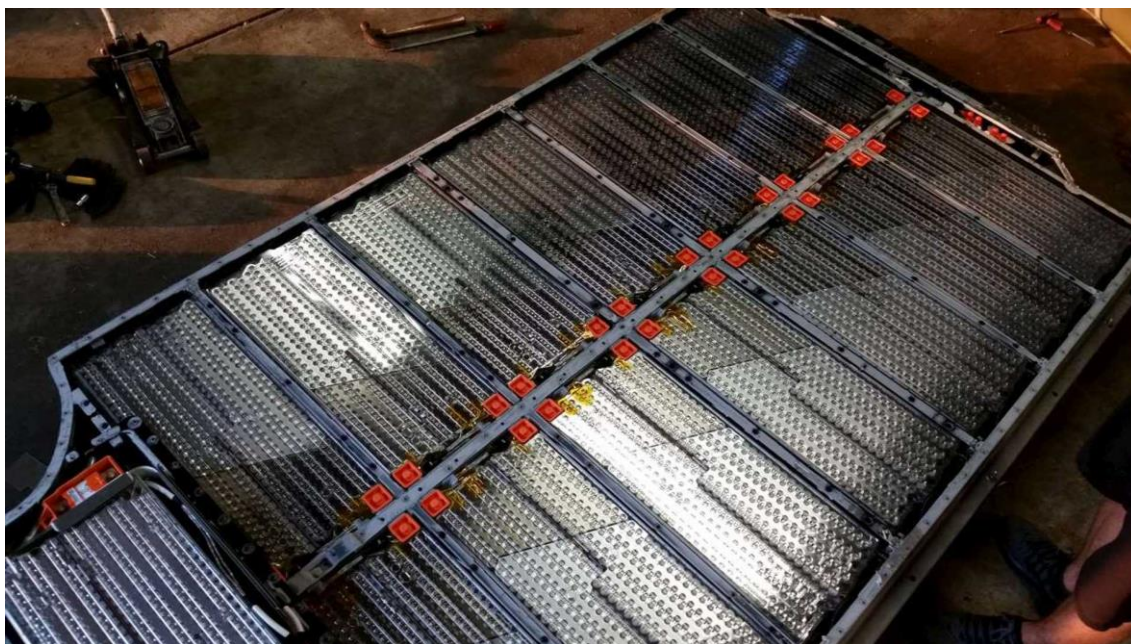
Výkonnější variantu představuje trojfázová nabíječka italského výrobce Zivan, konkrétně se jedná o model NG5 (varianty NG7 a NG9 se liší pouze vyšším výkonem). Určena je pro statickou instalaci (čemuž odpovídá i nízké krytí IP20) na napětí 400 V, nabíjecí proud 72 V verze je 55 A – pro akumulátory s kapacitou 265 až 395 Ah výrobce udává dobu nabíjení 7 – 8,5 hodin (pro uvažovanou kapacitu cca 140 Ah lze odhadem očekávat pětihodinové nabíjení) [44]. Samozřejmostí je CANBUS komunikace a vícero nabíjecích profilů pro různé druhy akumulátorů (olověné, případně i lithiové) [45].



Obr. 25 – Trojfázová nabíječka Zivan NG5 (zdroj: zivan.it)

Druhou technologií akumulátorů, kterou jsem zde chtěl zmínit, jsou **NiCd** (nikl-kadmiové) akumulátory. V minulosti v některých aplikacích náročných na nízkou hmotnost, jako například ručním elektrickým náradím, úspěšně nahradily do té doby jedinou známou technologii akumulátorů – výše zmiňované olovené – čímž de facto umožnily masové rozšíření těchto zařízení a udaly směr dalšího výzkumu. Použití však nebylo limitováno jen na malá zařízení, výjimečně nebyly ani trakční akumulátory s vyšším napětím a velkou kapacitou. V současné době se již jedná o technologii překonanou (samozřejmě s výjimkami, např. letecký průmysl stále NiCd akumulátory používá [46]) a tyto akumulátory se obtížně shánějí. Obecnou snahou je omezovat použití technologií využívajících toxické kadmium ve prospěch jiných, environmentálně bezpečnějších látek.

V současnosti nejpoužívanější technologií jsou **lithiové akumulátory**. Kategorie je označována jako Li-Ion, patří sem např. LiNiCoAlO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , LiCoO_2 nebo LiFeYPO_4 technologie. Dříve zmiňovaný elektromobil Tesla (Model S) pro své výkonné motory používá právě akumulátory této technologie (konkrétně neuvěřitelných 7 104 článků standardizované velikosti 18650 [47]), které tvoří prakticky celý podvozek vozidla, viz Obr. 26.



Obr. 26 – Baterie elektromobilu Tesla Model S (zdroj: InsideEVs.com)

Výhodou této technologie je v minulosti nepředstavitelná energetická hustota, a to jak objemová, tak hmotnostní. Např. akumulátory Panasonic NCR18650B mají dle výrobce objemovou energetickou hustotu 676 Wh/l a hmotnostní hustotu 243 Wh/kg [48]. Akumulátory jsou rovněž schopny dodávat velký proud, výjimkou nejsou hodnoty převyšující $10C^3$ (hodnoty se různí podle konkrétního chemického složení) [49]. Nabíjení je rovněž možné velkým proudem a samovybíjení je malé. Nevýhodou (alespoň ve vztahu k přestavbě) je vysoká pořizovací cena, potenciální nebezpečnost (riziko požáru akumulátorů některých technologií při nesprávném zacházení nebo poškození), nutnost skládání baterie z velkého množství jednotlivých článků – jmenovité napětí je obvykle 3,6 V nebo méně – a v neposlední řadě také potřeba speciálních nabíjecích a vyrovnávacích obvodů (BMS – „battery management system“).

Pro přestavbu se jako vhodná technologie jeví LiFeYPO₄ akumulátory, které nabízejí dlouhodobý dodávaný proud 3C (a až 20C krátkodobě), mají udávanou životnost více než 2 000 cyklů, nenesou s sebou riziko požáru („thermal runaway“ – při chemické reakci je uvolňován kyslík, který živí požár) a mají relativně nízkou hmotnost. Konkrétní zástupce je akumulátor Winston LFP160AHA s kapacitou 160 Ah (tj. srovnatelnou s olověnými akumulátory), trvalým vybíjecím proudem až 480 A (a až 3 200 A špičkově), nabíjecím proudem až 80 A a hmotností 6 kg. Značnou nevýhodou je napětí článku, které činí pouze 3,2 V, pro sestavení systému s požadovaným napětím (72 V) by tak bylo nutno zapojit zhruba

³ jednotka „C“ označuje proud vztážený ke kapacitě daného akumulátoru (např. pro kapacitu 10 Ah je proud označený jako 1C roven 10 A)

24 akumulátorů do série (tj. konfigurace 24S1P), celková hmotnost by poté činila cca 144 kg a kapacita cca 12,2 kWh. Hmotnost systému je o poznání nižší než u olověných akumulátorů, ty však lze zakoupit za o poznání nižší cenu – jeden článek LiFeYPO₄ stojí cca 7 100 Kč [50], k ceně je navíc nutno přičíst cenu ochranných a vyrovnávacích obvodů (bez kterých akumulátory nelze provozovat, při překročení nabíjecího nebo vybíjecího napětí je článek poškozován a může dojít k jeho zničení). Základní balanční modul je na Obr. 28 – tento modul musí být na každém článku, celkem by tedy bylo nutno osadit 24 modulů, což s cenou 640 Kč/ks [51] bateriový systém značně prodražuje.

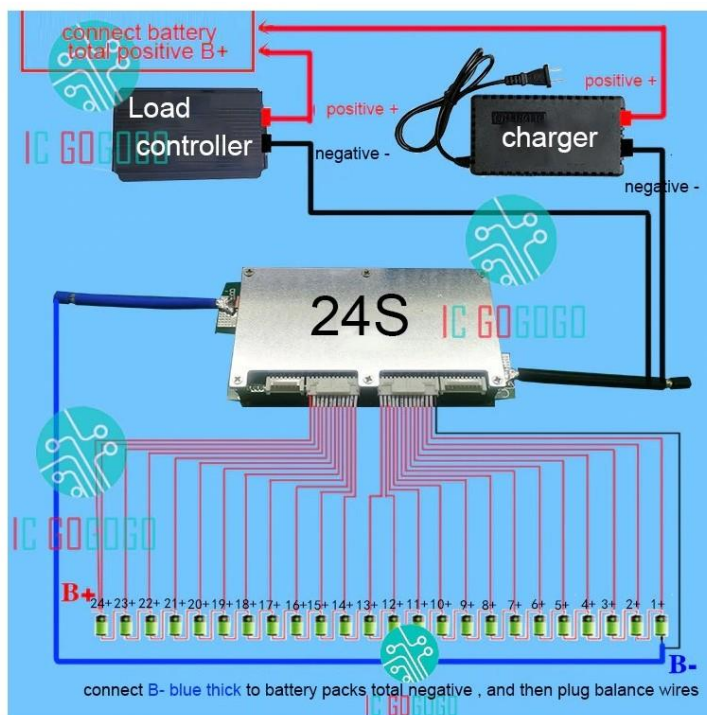


Obr. 27 – LiFeYPO₄ akumulátor Winston 160 Ah (zdroj: bch-battery.cz)



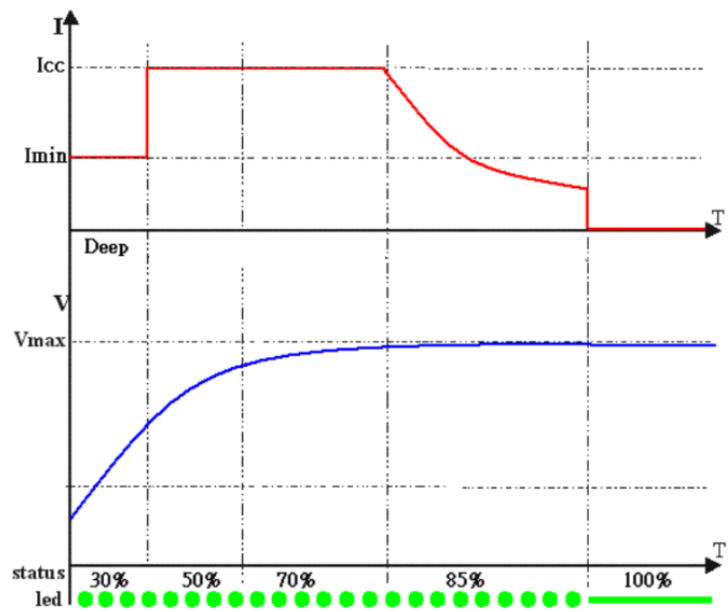
Obr. 28 – Balanční modul BS1V3 pro LiFePO₄ článek (zdroj: battery-import.cz)

LiFeYPO₄ baterie lze nabíjet vyššími proudy než olovené baterie, k využití této výhody je však nutno použít speciální nabíječku určenou přímo pro tuto technologii. Při nabíjení je navíc nutno monitorovat jednotlivé články baterie zvlášť, aby nedocházelo k jejich přebíjení – bez nutnosti použít jednotlivé balanční moduly lze použít jeden „velký“ BMS zapojený do série mezi záporný pól akumulátoru a kontroléru / nabíječky, viz Obr. 29. Tento konkrétní BMS je údajně schopen přenést proud až 300 A a stojí cca 270 € [52].



Obr. 29 – BMS pro 24S konfiguraci lithiových článků (zdroj: kit-elec-shop.com)

Nabíječka jako taková se od „standardních“ fyzicky příliš neliší – verze s nabíjecím proudem 35 A je příruční velikosti a provozovat ji lze na jednofázové síti 230 V. Rozdílný je způsob nabíjení, viz Obr. 30. Nevýhodou je, jak je u lithiových technologií obvyklé, vyšší pořizovací cena, výhodou rychlost nabíjení – při proudu 35 A (a kapacitě 160 Ah) lze očekávat odhadem čtyřhodinové nabíjení, případně i podstatně kratší, není-li nutné baterii nabíjet na plnou kapacitu. Konkrétní model (viz Obr. 31) POW72V35A-BMS lze v ČR zakoupit za zhruba 17 tisíc Kč [53].



Obr. 30 – Průběh napětí a proudu při nabíjení lithiové baterie (zdroj: ev-power.eu)

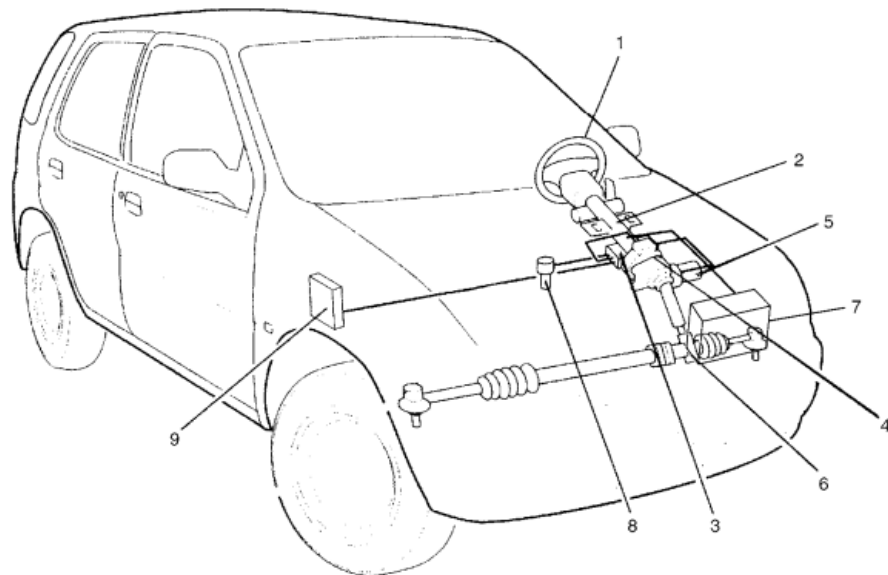


Obr. 31 – Nabíječka lithiových baterií 72V / 35A (zdroj: eskutr.cz)

4.4 Ostatní

Aby byl automobil uživatelsky co možná nejpřívětivější i po přestavbě, je vhodné zde zmínit některé komponenty, které by bylo nutné vyměnit nebo předělat, aby jejich funkce zůstala zachována.

V nízkých rychlostech, a tím spíše v terénu, je příjemné mít k dispozici **posilovač řízení**. Systém je zabudován přímo na sloupku řízení (na Obr. 32 označen číslem 2) a skládá se z řídicí jednotky posilovače (č. 3), senzoru krouticího momentu volantu (č. 4) a motoru se spojkou (č. 5). Data o rychlosti vozidla jsou získávána ze senzoru (č. 8) a celý systém ovládá řídicí jednotka (č. 9). Budoucímu použití posilovače řízení může bránit fakt, že řídicí jednotka vozu před demontáží spalovacího motoru pravděpodobně nebyla funkční, funkčnost posilovače tedy nelze s jistotou zaručit. Další nevýhodou je relativně velká spotřeba elektrické energie motorem posilovače, což v případě elektromobilu nemusí být žádoucí, neboť je tím do jisté míry snížen dojezd vozidla.



1. Steering wheel	4. Torque sensor	7. Battery
2. Steering column assembly	5. Motor and clutch	8. Vehicle speed sensor (VSS)
3. P/S control module	6. Steering gear box	9. ECM

Obr. 32 – Náskres systému posilovače řízení (zdroj: dílenská příručka s. 145; manualslib.com)

Druhým posilovačem, který je žádoucí mít k dispozici, je **posilovač brzd**. V tomto případě se jedná nejen o záležitost komfortu, ale i bezpečnosti řidiče. Hydraulický systém samozřejmě zůstává funkční i bez posilovače, k zabrzdění vozidla je ale nutné vyvinout podstatně větší sílu na brzdový pedál. Posilovač brzd v principu využívá podtlak vytvořený v sání spalovacího motoru. Ve zvláštním válci připojeném obvykle přímo k brzdovému pedálu se nachází membrána, na obou jejíchž stranách je v klidovém stavu nízký tlak (v žargonu označovaný jako vakuum). Při zachování rovnováhy tlaků na membránu nepůsobí žádná síla. Sešlápnutím brzdového pedálu je na jednu („tlačící“) stranu membrány vpuštěn atmosférický tlak, zatímco na straně druhé („tlačené“) je zachován nízký tlak – membrána působí silou na hlavní brzdový válec, který je hydraulicky spojen s písty brzdiců na jednotlivých kolech [54]. Síla dodávaná rozdílem tlaků na membráně je mnohem větší než primární síla působící na brzdový pedál.

V elektromobilu je možné vakuum vytvořit s pomocí elektrické pumpy (vývěvy). Tato zařízení obvykle mají poměrně velký výkon, aby byla schopna rychle vytvořit dostatečný podtlak kolem membrány, a v akumulátory poháněném vozidle tedy není žádoucí, aby byla v provozu nepřetržitě. Řešením je systém pumpy a vakuové nádoby – pumpa je v provozu pouze do té doby, dokud v nádobě není vytvořen dostatečný podtlak, poté je přívod do nádoby uzavřen a pumpa je vypnuta. Při brzdění je podtlak „odebírán“ z nádoby (technicky se samozřejmě jedná o snižování tlaku na „tlačené“ straně membrány na úkor zvýšení tlaku v podtlakové nádobě), po nárůstu tlaku je opětovně vyčerpána pumpou. Sada na instalaci elektrické pumpy s vakuovou nádobou je běžně k dispozici, tato konkrétní sada (na Obr. 33 bez nádoby) za 367 \$ [55].



Obr. 33 – Elektrická vakuová pumpa (zdroj: evsource.com)

Zajímavou metodou pro zvýšení dojezdu je umístění **solárního panelu** na střechu elektromobilu. Nutno podotknout, že nelze očekávat „záračné“ dobíjecí schopnosti panelu tak malé velikosti, může se však jednat o další zajímavý „doplňek“ palubní elektrické sítě. Problémem je napětí systému – jednotlivé panely s napětím 72 V nejsou k dispozici, řešením by bylo nabíjení vždy pouze jednoho akumulátoru napětím 12 V (v principu by se jednalo o nahrazení alternátoru). Na omezené ploše dané rozměry střechy lze využít např. polykrystalický panel Victron Energy s výkonem 115 Wp, maximálním proudem 6,08 A a napětím 12 V. S hmotností 8 kg a cenou cca 2 800 Kč s DPH [56] se v kontextu přestavby jedná o drobnou položku.

Důležitou část systému tvoří **monitorování stavu baterií** – jedná se o analogii ukazatele množství paliva v nádrži v konvenčním automobilu – málokterý motorista by vyrazil na cestu, aniž by věděl, jestli má dostatek paliva i na cestu zpáteční. Jednoduchý monitor je např. BMV-700, který je vybaven i bočníkem, je tedy schopen zobrazovat nejen napětí akumulátoru, ale i aktuální proud a výkon dodávaný do motoru. Displej (na Obr. 34) lze nainstalovat do palubní desky a mít tak všechny potřebné údaje pohodlně k dispozici. Prodejní cena je 3 900 Kč s DPH [57].



Obr. 34 – Monitor stavu baterie BMV-700 (zdroj:eskutr.cz)

Pokud by byl automobil osazen výkonným motorem (nebo motorem s nedostatečně dimenzovaným vzduchovým chlazením – změna způsobu chlazení na vodní by zde však byla značně komplikovaná), lze doporučit **vodní chlazení**. Na chladicí okruh by případně bylo možno připojit kontrolér, obtížněji i akumulátory. Ve standardním automobilu je vodní čerpadlo zakomponováno přímo do motoru a je jím poháněno – po přestavbě by bylo nutné toto čerpadlo nahradit elektrickou vodní pumpou s dostatečným průtokem. Výkon pumpy je dimenzován podle délky chladicího okruhu, průřezu hadic, počtu a druhu zúžení apod. – přesný návrh přesahuje rozsah této práce. S rezervou by pravděpodobně bylo možné použít pumpu Davies Craig (na napětí 12 V) s průtokem 80 l/min, prodejní cena je cca 5 800 Kč s DPH [58]. K odvodu tepla z okruhu lze využít stávající chladič (tj. zpětně jej namontovat) a případně i ventilátor, pro chlazení dalších komponent by nejspíše bylo nutné vyrobit chladicí podložky na míru (např. z hliníku na CNC stroji).

4.5 Sestavení variant

V předchozích kapitolách byly popsány jednotlivé technologie použitelné pro přestavbu. Před ekonomickým shrnutím a zhodnocením je proto logické sestavit několik variant, tj. kombinací motoru, kontroléru a napájecího systému, které budou následně porovnávány.

Nejlevnější možná varianta je využití staršího sériového motoru např. z vysokozdvížného vozíku. Cena takového motoru by nejvíce závisela na jeho technickém stavu, osobně odhaduji, že za částku kolem 5 000 Kč by bylo možné „slušný“ motor zakoupit. K řízení postačí kontrolér Kelly KDZ (72 V / 400 A verze) za 299 \$. S myšlenkou minimalizace celkové investice jsou voleny i akumulátory – „obyčejné“ startovací olověné, z nichž nejlevnější stojí 997 Kč.

Pro variantu využívající stejnosměrný motor bych doporučil použití stroje s permanentními magnety, zejména z důvodu nižší hmotnosti, schopnosti rekuperace a vyšší účinnosti, která je při omezeném množství dostupné energie klíčová. Z popsaných modelů se jedná o motor Motenergy ME1003 (680 \$), řízení s využitím rekuperace obstará kontrolér Sevcon Gen4 DC (650 \$).

Varianta se střídavým motorem v zásadě replikuje variantu stejnosměrnou – motor s permanentními magnety je v současnosti zkrátka nejlepší dostupná technologie. Motor Motenergy ME1114 (675 \$) lze řídit kontrolérem Sevcon Gen4 S4 (verze 350 A, 925 \$ [59]).

Ačkoliv jsou lithiové akumulátory v komerčních elektromobilech jasně preferovaná technologie, pro „domácí“ použití jsou stále finančně nákladné. Z tohoto důvodu navrhuji použití trakčních olověných akumulátorů – odolných Varta Professional Deep Cycle AGM (8 690 Kč/ks, celkem tedy 52 140 Kč). Na jednofázové nabíjení navrhuji použití nabíječky QuiQ 1500 (48 V varianta stojí cca 450 \$ [60], u 72 V verze odhaduji cenu okolo 550 \$). Pro porovnání lze teoreticky uvažovat i variantu s LiFeYPO₄ články, které by stály 170 400 Kč, plus 270 € za BMS. Nabíječka lithiových baterií stojí 17 tisíc Kč, jak bylo zmíněno dříve.

Variantně indiferentní výdaje zahrnují systém posilovače brzd (367 \$), solární panel (2 800 Kč), monitorování baterie (3 900 Kč) a spojovací materiál, v rámci kterého největší položku tvoří silové vodiče propojující baterie s motorem a kontrolérem. Délka těchto vodičů závisí zejména na umístění baterií – z důvodu zachování „továrního“ rozložení hmotnosti ve vozidle je žádoucí většinu hmotnosti orientovat do motorového prostoru, případně do kabiny (např. místo sedačky spolujezdce), v krajním případě i do zavazadlového prostoru. Pro přenos proudu 150 A (který jistě nebude přenášen nepřetržitě) by měl dostačovat kabel s průřezem 50 mm² (odpovídá zhruba 0 AWG [61]), celkovou délku s rezervou odhaduji na 10 m; cena takového kabelu je cca 165 Kč/m [62], celkem tedy 1 650 Kč. Cena ostatního materiálu (zahrnuje např. stykače, pojistky, konektory apod.) je odhadnuta na částku 2 500 Kč.

5 Investiční a provozní výdaje

Cílem této kapitoly je shrnutí investičních a provozních výdajů, a to primárně pro jednorázovou (individuální) přestavbu.

5.1 Investiční výdaje

Investiční výdaje jednotlivých variant jsou dány jako prostý součet prodejních cen jednotlivých komponent dané varianty. Varianty reprezentují tři kategorie – nejlevnější možnou verzi bez „komfortních“ doplňků, střídavou verzi s doplňky napájenou olovenými akumulátory a střídavou verzi (rovněž s doplňky) s LiFeYPO₄ akumulátory. Stejnoseměrná varianta např. s PMDC motorem a vhodným kontrolérem cenou přibližně odpovídá variantě střídavé – rozhodujícím faktorem je použitá technologie akumulátorů. Pro přepočtení cen z cizích měn byl použit průměrný kurz aktuální v měsících před psaním této práce⁴ – 25 Kč/EUR a 23 Kč/USD.

Tab. 1 – Přehled investičních výdajů varianty 1

Komponent	Model	Cena/ks	Cena celkem v Kč ⁵
Motor	Balkancar ET6,3		5 000 Kč
Kontrolér	Kelly KDZ	299 \$	6 900 Kč
Akumulátory	BARS 44 Ah	997 Kč	6 000 Kč
Nabíječka	QuiQ 1500	550 \$	12 700 Kč
Silové vodiče			1 700 Kč
Ostatní materiál			2 500 Kč
Celkem varianta 1			34 800 Kč

⁴ Před březnem 2020, kdy došlo ke skokové změně kurzů v důsledku pandemie

⁵ Cena je zaokrouhlena na celé stokoruny nahoru

Tab. 2 – Přehled investičních výdajů varianty 2

Komponent	Model	Cena/ks	Cena celkem v Kč
Motor (AC)	ME1114	675 \$	15 600 Kč
Kontrolér (AC)	Sevcon Gen4 S4	925 \$	21 300 Kč
Akumulátory	Varta DC AGM	8 690 Kč	52 200 Kč
Nabíječka	QuiQ 1500	550 \$	12 700 Kč
Posilovač brzd	sada	367 \$	8 500 Kč
Solární panel	Victron 115 Wp		2 800 Kč
Monitoring	BMV-700		3 900 Kč
Silové vodiče			1 700 Kč
Ostatní materiál			2 500 Kč
Celkem varianta 2			121 200 Kč

Tab. 3 – Přehled investičních výdajů varianty 3

Komponent	Model	Cena/ks	Cena celkem v Kč
Motor (AC)	ME1114	675 \$	15 600 Kč
Kontrolér (AC)	Sevcon Gen4 S4	925 \$	21 300 Kč
Akumulátory	LiFeYPO ₄	7 100 Kč	170 400 Kč
BMS		270 €	6 800 Kč
Nabíječka	POW72V35A-BMS		17 000 Kč
Posilovač brzd	sada	367 \$	8 500 Kč
Solární panel	Victron 115 Wp		2 800 Kč
Monitoring	BMV-700		3 900 Kč
Silové vodiče			1 700 Kč
Ostatní materiál			2 500 Kč
Celkem varianta 3			250 500 Kč

Pohledem na celkové investiční výdaje jednotlivých variant je očividné, že pouhé srovnání variant z tohoto hlediska není vhodné. U každé varianty je předpokládána jiná životnost komponent, zejména akumulátorů; tento fakt bude zohledněn v následující kapitole, ve které budou jednotlivé varianty podrobněji porovnány.

5.2 Provozní výdaje

Provozní výdaje jsou určeny jako roční cena elektrické energie spotřebované na nabíjení akumulátorů přestavěného vozidla, další údržba není předpokládána. Pro porovnání budou orientačně stanoveny i provozní výdaje původního vozidla se spalovacím motorem.

Prvním krokem výpočtu je určení ročního počtu nabíjecích cyklů, jenž bude v následující kapitole do výpočtů promítnut v očekávané životnosti akumulátorů: předpokládáný roční nájezd činí cca 1 000 km a jednorázový dojezd 20 km – vozidlo bude provozováno ve „víkendovém“ provozu, tj. jednou za týden vybití a následné nabití; celkem tedy zhruba 50 cyklů ročně.

Varianta 1 (nejlevnější možná dle přání investora) využívá akumulátory s kapacitou 44 Ah – nelze zde předpokládat stejný dojezd jako u ostatních variant (s čímž je investor obeznámen – tato varianta by byla užívána „kolem domu“, dojezd v terénu by činil odhadem cca 5 km), uvažuji však stejný provozní režim, tj. jeden vybíjecí a nabíjecí cyklus týdně. Celková životnost akumulátorů bude dle hloubky vybití podstatně kratší než o ostatních variant – při 50% DoD startovací baterie „přežije“ 100 cyklů [36], tj. dva roky provozu.

Varianta 2 využívá trakční DC⁶ akumulátory s kapacitou 150 Ah, u níž výrobce pro 50% DoD udává životnost 800 cyklů. Pro 100% vybití odhaduji životnost 250 cyklů, tj. 5 let provozu. Dojezd v terénu lze v porovnání s první variantou očekávat zhruba čtyřnásobný.

Varianta 3 s LiFeYPO₄ články má kapacitu 160 Ah a udávaná životnost je 2 000 cyklů, tj. 40 let provozu.

Nabíjení bude prováděno v distribučním území společnosti E.ON, dodavatelem energie je společnost Energie ČS. Sazba v místě odběru je D25d, tj. dvoutarifní účtování, cena za odebranou jednotku energie činí u produktu „Standard elektřina“ 4 933 Kč/MWh ve vysokém tarifu (VT), resp. 2 893 Kč/MWh v tarifu nízkém (NT) [63]. Právě využití nízkého tarifu („nočního proudu“) by v minulosti bylo pro nabíjení ideální, v současné době je ale spínáno signálem HDO a časy jeho sepnutí v průběhu dne se mění. Investor má vyvedeny zásuvky, které jsou v provozu pouze na NT – lze tedy nabíjet levnější elektřinou, celková doba nabíjení však může být rozložena do většího časového úseku. Fixní platby nejsou pro výpočet relevantní – cena za odběrné místo a cena za příkon zůstávají stejné jako před přestavbou vozidla.

Při použití nabíječky QuiQ 1500, jejíž udávaná účinnost je 94 % [43], je roční cena spotřebované elektřiny určena dle vztahu:

⁶ „deep cycle“

$$\text{roční cena (Kč)} = \frac{\text{kapacita (Ah)} \cdot \text{napětí (V)}}{1000} \cdot \frac{1}{\text{účinnost (\%)}} \cdot \text{počet cyklů/rok} \cdot \text{cena (Kč/kWh)}.$$

Pro Variantu 1 tedy

$$P_1 = \frac{44 \cdot 72}{1000} \cdot \frac{1}{0,94} \cdot 50 \cdot 2,893 \doteq 488 \text{ Kč},$$

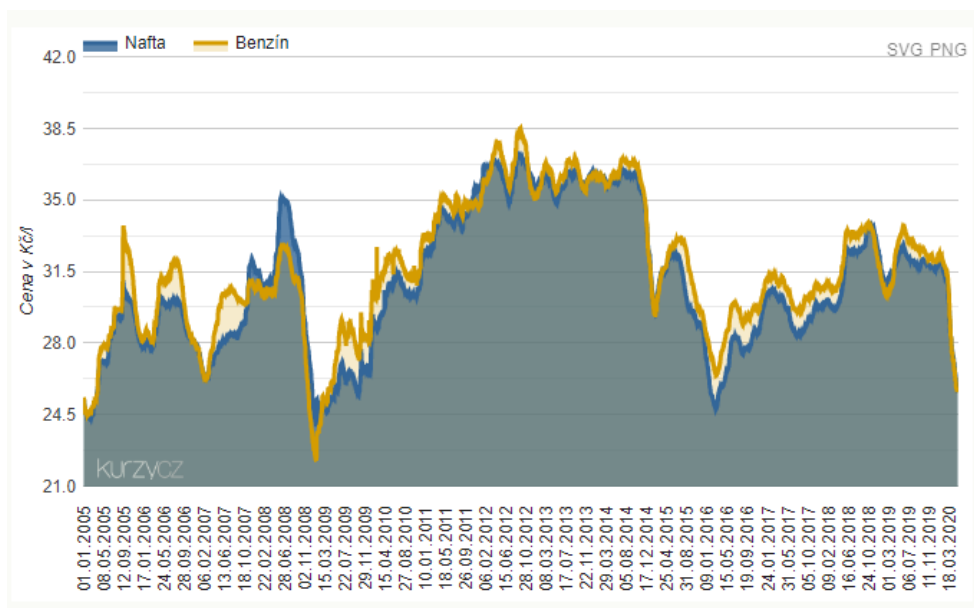
a pro Variantu 2

$$P_2 = \frac{150 \cdot 72}{1000} \cdot \frac{1}{0,94} \cdot 50 \cdot 2,893 \doteq 1\,662 \text{ Kč}.$$

Nabíječka lithiových akumulátorů POW72V35A má udávanou účinnost přes 80 % [64], cena spotřebované elektřiny Varianty 3 je určena stejným výpočtem:

$$P_3 = \frac{160 \cdot 76,8}{1000} \cdot \frac{1}{0,80} \cdot 50 \cdot 2,893 \doteq 2\,222 \text{ Kč}.$$

Standardní spalovací motor má v terénu při nízké rychlosti a zařazeném prvním stupni poměrně velkou spotřebu paliva – z vlastní zkušenosti vím, že na displeji palubního počítače obdobného vozidla lze v takové situaci pozorovat čísla převyšující hodnotu 30 litrů na 100 km. Pro výpočet odhaduji tuto spotřebu na 15 l / 100 km; stejně jako u elektromobilu je tato hodnota samozřejmě závislá na terénu, způsobu jízdy a dalších faktorech. Cena benzínu je v současné době na desetiletém minimu (viz Obr. 35), a lze tak očekávat, že opět poroste – jako průměrnou cenu do výpočtu uvažuji hodnotu 29 Kč/l. U spalovacího motoru by bylo možno uvažovat i výměnu motorového oleje, vzhledem k malému ročnímu nájezdu však lze tuto údržbu a z ní vyplývající náklady zanedbat.



Obr. 35 – Graf vývoje ceny benzínu a nafty v čase (zdroj: kurzy.cz)

Roční cena za spotřebovaný benzín je určena ze vztahu

$$P_{benzín} = \text{spotřeba (l/100 km)} \cdot \frac{\text{dojezd (km)}}{100} \cdot \text{cena (Kč/l)} \cdot \text{počet cyklů/rok},$$

po dosažení

$$P_{benzín} = 15 \cdot \frac{20}{100} \cdot 29 \cdot 50 = 4\,350 \text{ Kč}.$$

5.3 Hromadná přestavba

Jedním z bodů zadání této práce bylo i stanovení investičních a provozních výdajů pro hromadnou přestavbu; zde je proto krátká zmínka o současném stavu hromadných přestaveb.

Situace je poměrně jednoduchá – na trhu není po tomto druhu produktu zkrátka dostatečná poptávka. Hromadným přestavbám se v ČR věnovala např. společnost EVC Group z Hulína, která B2C přestavby nabízela od svého vzniku v roce 2007 do roku 2013, kdy se přeorientovala na B2B trh [65].

Ve Velké Británii jednorázové přestavby realizuje společnost Zero EV. Většinu obchodů společnost rovněž směřuje do B2B sféry a v rámci své B2C činnosti se zaměřuje na „výjimečné“ automobily, jako například sportovní vozy. Pro potenciální zájemce o jednorázovou přestavbu je

na webu společnosti uvedeno upozornění: „*Prior to contacting us in regards to one off conversions please be aware that the average parts cost is currently in the region of £25,000+*“ [66]. V tomto upozornění je „zakopaný pes“ problematiky hromadných přestaveb – jen cena dílů v současnosti převyšuje 750 tisíc Kč.

Ve světě je podobných společností vícero. Obvykle se zaměřují na výrobu vlastních, jedinečných elektromobilů, případně na přestavbu jednoho konkrétního vozidla, jako například holandská společnost Voitures Extravert, která přestavuje Porsche 911 z 70. a 80. let minulého století na elektromobily [67]. Cena jedné přestavby převyšuje 300 tisíc euro.

Zájemce o koupi elektromobilu dnes pravděpodobně sáhne po komerční variantě od velkého výrobce – cena přestavby staršího vozu je v kontextu cen nových elektromobilů stále příliš vysoká a přináší více komplikací. Nový elektromobil navíc disponuje nejnovějšími technologiemi, které přestavované vozidlo nabídnout nemůže. S postupným rozšiřováním elektromobilů a snižováním jejich ceny lze očekávat zvýšenou nabídku náhradních dílů, jejichž nižší cena by mohla podpořit i rozšíření trhu s přestavbami. Klasický automobilový průmysl má však dlouhodobou tradici, a tak očekávám, že ještě mnoho let bude preferovaným řešením koupě ojetého vozu se spalovacím motorem, případně i ojetého elektromobilu.

6 Ekonomické posouzení variant

Závěrečná kapitola je věnována celkovému posouzení jednotlivých variant, tj. včetně zahrnutí různých životností jednotlivých komponent, časové ceny peněz, různých dosažitelných dojezdů apod.

Investiční výdaje byly přepočteny na roční výdaje pomocí poměrné annuity za dobu životnosti dané komponenty (označené indexem x) dle vzorce:

$$I_{x(\text{rok})} = I_x \cdot \frac{(1+r)^{T_x} \cdot r}{(1+r)^{T_x} - 1}$$

hodnota diskontu (r) byla stanovena na 2 % jako bezrizikový výnos alternativní investice⁷, např. protiinflačních (nebo jiných) státních dluhopisů [68]. Přepočtené roční výdaje všech komponent dané varianty byly sečteny s provozními výdaji, a aby byly varianty vzájemně porovnatelné, tento součet byl vydělen předpokládaným ročním nájezdem.

Výdaje na ujetý kilometr byly následně zkoumány pro různé hodnoty diskontu (v rozmezí od 2 do 5 procent) a také pro různé kapacity akumulátorů (tj. pro dojezd 5, 10, 15 a 20 kilometrů pro každou variantu). Pro určení ceny akumulátorů pro jiný než původně zamýšlený dojezd (např. pro dojezd 10 km u Varianty 1 nebo 5 km u Varianty 2) byla potřebná kapacita akumulátorů (a tím pádem i jejich cena) přepočtena za předpokladu lineární závislosti ceny na kapacitě, tzn. dvojnásobný požadovaný dojezd \approx dvojnásobná kapacita akumulátorů \approx dvojnásobné investiční výdaje.

Varianty 1

Životnost komponent a přepočtené roční výdaje zobrazuje Tab. 4. Životnost akumulátorů byla určena výše z počtu vybíjecích cyklů, ostatní hodnoty jsou určeny odhadem – zejména u použitého motoru životnost závisí na jeho původu, době a způsobu provozu a dalších faktorech (pravděpodobně by byla i vyšší než uvažovaných 5 let). U ostatních komponent není předpokládáno velké namáhání a životnost proto byla zvolena na 15 let.

⁷ ačkoliv představbu nelze považovat za investici v tradičním slova smyslu

Tab. 4 – Přehled životnosti komponent a ročních výdajů (varianta 1, diskont 2 %)

Komponent	Označení	Životnost (roky)	Roční inv. výdaje
Motor	Balkancar ET6,3	5	1 061 Kč
Akumulátory	BARS 44 Ah	2	3 090 Kč
Nabíječka	QuiQ 1500	15	988 Kč
Kontrolér	Kelly KDZ	15	537 Kč
Vodiče		15	132 Kč
Ostatní		15	195 Kč
Celkem investiční výdaje			6 003 Kč
Provozní náklady			488 Kč
Celkové roční výdaje			6 491 Kč
Předpokládaný nájezd			250 km
Celková cena za km			25,97 Kč/km

Varianta 2

Výdaje byly přepočteny analogicky k Variantě 1, rozdílem je zde životnost nového motoru, která byla odhadnuta na 15 let, tj. shodně s ostatními komponenty.

Tab. 5 – Přehled životnosti komponent a ročních výdajů (varianta 2, diskont 2 %)

Komponent	Označení	Životnost (roky)	Roční inv. výdaje
Motor	ME1114	15	1 214 Kč
Akumulátory	Varta DC 150 Ah	5	11 075 Kč
Nabíječka	QuiQ 1500	15	988 Kč
Kontrolér	Sevcon Gen4	15	1 658 Kč
Vodiče		15	132 Kč
Posilovač brzd	sada	15	662 Kč
Solární panel	Victron 115 Wp	15	218 Kč
Monitoring	BMV-700	15	304 Kč
Ostatní		15	195 Kč
Celkem investiční výdaje			16 445 Kč
Provozní náklady			1 662 Kč
Celkové roční výdaje			18 107 Kč
Předpokládaný nájezd			1 000 km
Celková cena za km			18,11 Kč/km

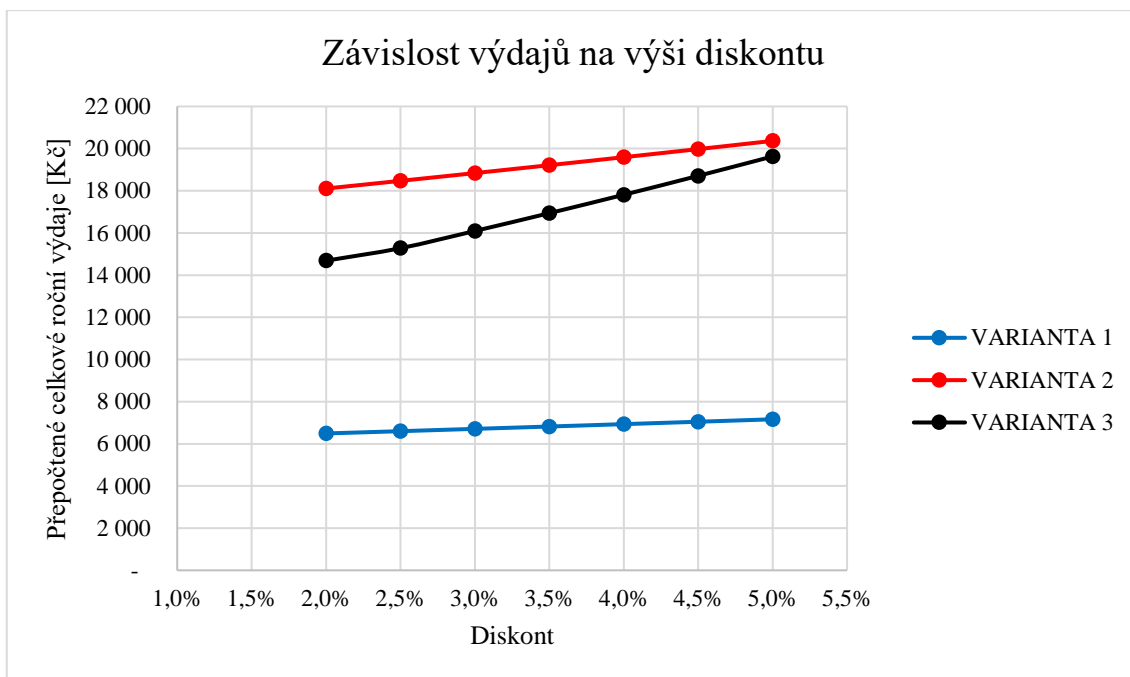
Varianta 3

Varianta s LiFeYPO₄ akumulátory je zásadně rozdílná v předpokládané životnosti akumulátorů, která osminásobně převyšuje životnost akumulátorů použitých ve Variantě 2. Realisticky nepředpokládám, že představované vozidlo bude provozováno následujících 40 let – pokud by ale byla uvažována životnost nižší, nebylo by možné z ekonomického hlediska obhájit použití této technologie akumulátorů. Pokud by vozidlo sloužilo zmiňovaných 15 let, bylo by následně možné akumulátory použít například jako úložiště elektrické energie získané ze solárních panelů. Změnou zapojení by tento systém měl při napětí 12 V kapacitu 960 Ah, a při nízké spotřebě objektu by bylo možné uvažovat i o ostrovním provozu.

Tab. 6 – Přehled životnosti komponent a ročních výdajů (varianta 3, diskont 2 %)

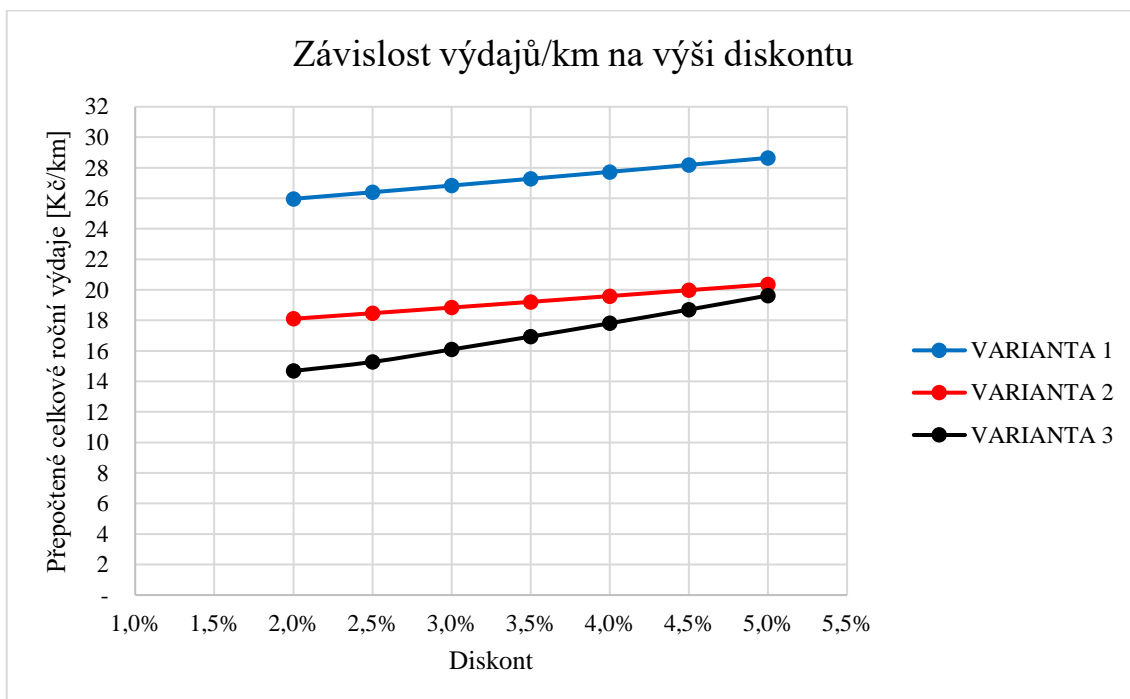
Komponent	Označení	Životnost (roky)	Roční inv. výdaje
Motor	ME1114	15	1 214 Kč
Akumulátory	LiFeYPO ₄	40	6 229 Kč
Nabíječka	POW72V35A	15	988 Kč
BMS		15	529 Kč
Kontrolér	Sevcon Gen4	15	1 658 Kč
Vodiče		15	132 Kč
Posilovač brzd	sada	15	662 Kč
Solární panel	Victron 115 Wp	15	218 Kč
Monitoring	BMV-700	15	304 Kč
Ostatní		15	195 Kč
Celkem investiční výdaje			12 463 Kč
Provozní náklady			2 222 Kč
Celkové roční výdaje			14 685 Kč
Předpokládaný nájezd			1 000 km
Celková cena za km			14,68 Kč/km

Dalším krokem srovnání je posouzení vlivu diskontu na přepočtené roční výdaje (tj. včetně provozních nákladů), viz Obr. 36. Patrná je nízká závislost u Varianty 1, zejména z důvodu kratší životnosti dražších komponent, naopak velký vliv diskontu lze pozorovat u Varianty 3 – nejdražší položkou zde jsou akumulátory, které rovněž mají nejdelší životnost.



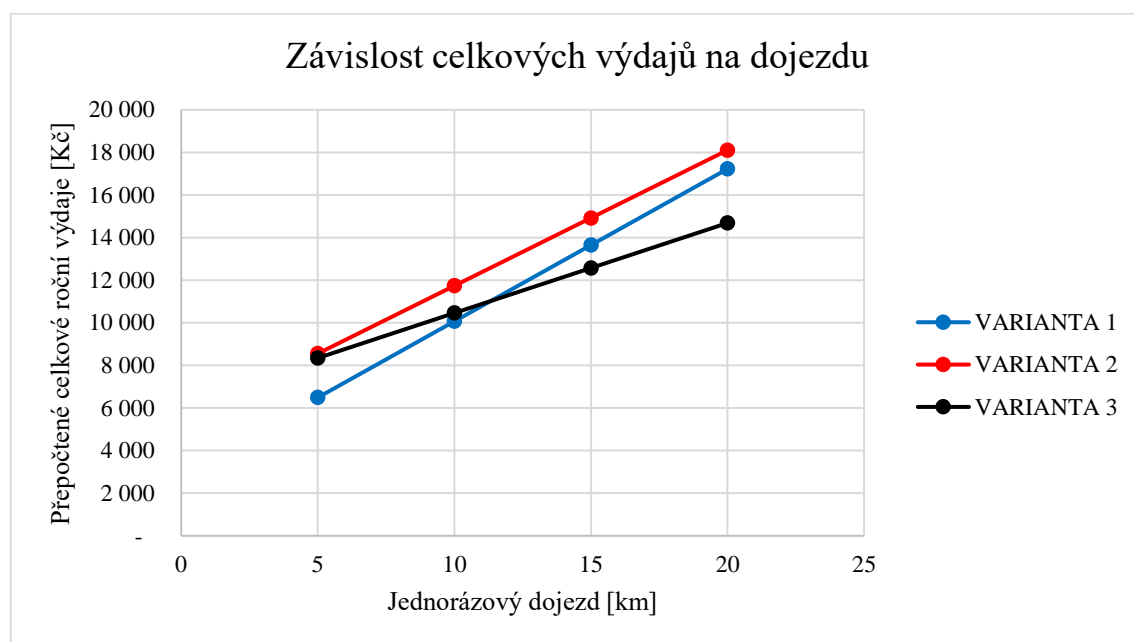
Obr. 36 – Závislost ročních výdajů na diskontu

Obdobnou situaci lze pozorovat na Obr. 37. Vlivem malého dojezdu u Varianty 1 má však hodnota diskontu větší vliv na celkové náklady na najetý kilometr.

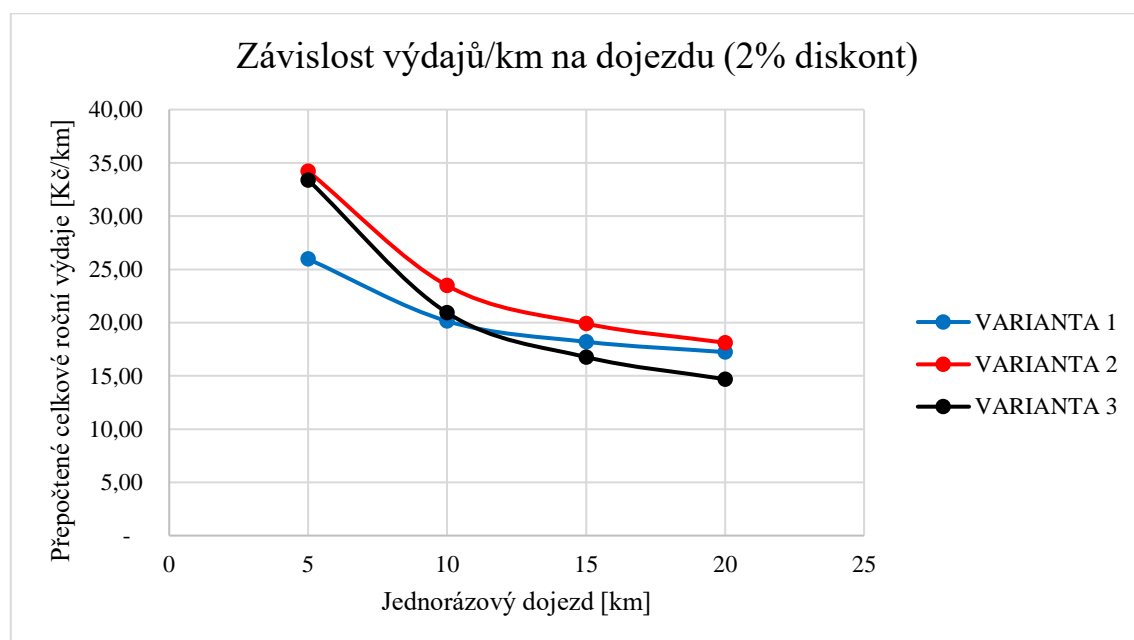


Obr. 37 – Závislost ročních výdajů/km na diskontu

Zajímavá situace nastává v případě, že je požadován jiný (vyšší u Varianty 1 nebo nižší u Varianty 2 a Varianty 3) jednorázový dojezd. Z grafu závislosti celkových ročních výdajů (Obr. 38) a ceny za najetý kilometr (Obr. 39) na dojezdu je patrné, že v případě, kdy dostačuje nižší dojezd (cca do 12 km), je nejméně nákladná Varianta 1. Naopak pro vyšší požadovaný dojezd (tzn. větší kapacitu akumulátorů) je při 2% diskontu ekonomicky nejvýhodnější Varianta 3.

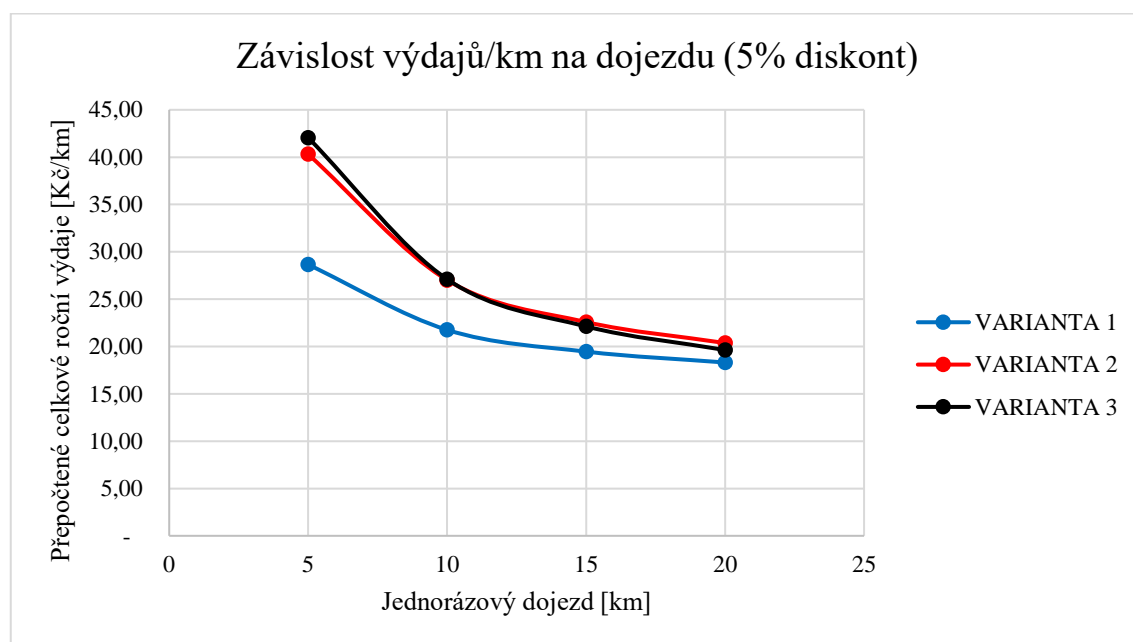


Obr. 38 – Závislost celkových výdajů na požadovaném dojezdu pro 2% diskont



Obr. 39 – Závislost výdajů/km na požadovaném dojezdu pro 2% diskont

Při předpokladu 5% diskontu graf vypadá odlišně – pro libovolný požadovaný dojezd (do 20 km) je nejvýhodnější Varianta 1; pro nízký požadovaný dojezd (do 10 km) je Varianta 2 ekonomicky výhodnější než Varianta 3. Nejedná se však o dramatický rozdíl, vysvětlit jej lze např. různou citlivostí na výši diskontu, rozdílnou účinností nabíjení a mírně rozdílnou kapacitou akumulátorů v každé variantě pro daný dojezd.



Obr. 40 – Závislost výdajů/km na požadovaném dojezdu pro 5% diskont

Doporučení pro investora není zcela jednoznačné a silně závisí na jeho požadavcích. Je-li cílem minimalizace vstupní investice a dostačuje-li nižší jednorázový dojezd, lze jako postačující označit Variantu 1. Varianta 2 využívající trakční akumulátory nabízí sice delší dojezd (a další komfortní funkce, které však lze přidat i k Variantě 1 dle požadavků a finančních možností investora), ten ale ani v kombinaci s delší životností nevyvažuje vysokou cenu akumulátorů. Akumulátory Varianty 3 jsou v současnosti nejlepší dostupná technologie, tento fakt je ale promítnut do vysoké prvotní investice. Tuto variantu doporučuji v případě, že je požadován vysoký dojezd, a má-li investor po ukončení provozu možnost dalšího využití (nebo prodeje) použitých akumulátorů. Pokud toto není předpokládáno, nelze ekonomicky obhájit vysokou cenu akumulátorů a dlouhá životnost zůstává zaplacená, avšak nevyužita.

7 Závěr

Cílem této práce byl popis přestavby automobilu Suzuki Ignis na elektromobil. Úvodní část byla věnována popisu stavu vozidla před přestavbou a účelu přestavby. Ve druhé části byly (zejména pro porovnání) popsány parametry vozu před přestavbou. Ve třetí kapitole byl vypočten výkon elektromotoru potřebný k dosažení investorem zadaných parametrů – pro stoupání 12° a celkovou hmotnost soupravy 2 000 kg byl tento výkon stanoven na hodnotu cca 15 kW. Rovněž bylo zmíněno, že pro jízdu v menším terénu nebo s nižším zatížením vozidla by postačoval elektromotor s nižším výkonem. Dalším krokem bylo vypočtení požadovaných otáček motoru – bylo zjištěno, že pro dosažení požadované rychlosti 10 km/h na druhý převodový stupeň by bylo vhodné přidat mezi nový elektromotor a původní převodovku další převod.

Hlavní část práce je věnována popisu technologií motorů použitelných pro přestavbu a způsobu řízení jejich otáček.

Zmíněny byly sériové stejnosměrné kartáčové motory a jejich „analogové“ řízení pomocí stykačů, snazším a uživatelsky příjemnějším způsobem řízení by však představovaly kontroléry, z nichž bylo několik modelů vybráno a popsáno. Zmíněna byla i možnost použití cize buzeného stejnosměrného motoru a modernějšího motoru buzeného permanentními magnety.

V rámci popisu motorů na střídavé napětí byly popsány asynchronní motory (a jejich nevýhody při použití při přestavbě), větší pozornost byla však věnována motorům synchronním s permanentními magnety (PMDC, PMSM). Tyto motory v současnosti dosahují nejvyšších účinností a jeví se tak jako nejlepší použitelná technologie.

Následující část práce byla zaměřena na popis technologií akumulátorů. Po výpočtu potřebné kapacity byly diskutovány hlavně tradiční olověné akumulátory (startovací i trakční) a moderní LiFeYPO_4 články. Ke konkrétním typům akumulátorů bylo vybráno i potřebné příslušenství včetně nabíječek.

Před ekonomickou částí práce byly popsány i další části vozidla, na které by se při přestavbě bylo vhodné také zaměřit – zejména se jednalo o posilovač brzd. Zmíněna byla např. i možnost umístění solárních panelů na střechu vozidla pro mírné dobíjení akumulátorů.

Úvod ekonomické části práce je věnován výpočtu investičních výdajů jednotlivých variant – první varianta byla vytvořena jako nejlevnější možná na přání investora (s využitím použitého motoru a startovacími akumulátory). Druhá varianta využívá střídavý PMSM motor s výkonem 10 kW a trakční olověné (deep cycle) akumulátory, přítomny jsou i „komfortní“ funkce vozu. Třetí varianta se od druhé liší pouze použitými akumulátory, olověné zde byly nahrazeny lithiovými.

Na závěr kapitoly byla krátce diskutována situace na trhu hromadných přestaveb.

Poslední kapitola je věnována samotnému ekonomickému porovnání jednotlivých variant. Provozní náklady byly určeny ze spotřeby elektrické energie při nabíjení, jejíž množství bylo vypočteno na základě kapacity akumulátorů, ročního režimu provozu (jedna jízda týdně) a účinnosti příslušné nabíječky. Roční cena byla stanovena dle tarifu odběrného místa, kde bude elektromobil nabíjen.

U každé varianty byla odhadnuta životnost každé komponenty a investiční výdaje byly přepočteny (při stanoveném diskontu) na roční; aby byly varianty snáze porovnatelné, byly celkové roční výdaje (tj. včetně provozních nákladů) dále přepočteny na najetý kilometr.

V závěru práce byl zkoumán vliv výše diskontní sazby a požadovaného jednorázového dojezdu na celkové a kilometrové výdaje. Na základě těchto analýz bylo investorovi doporučeno zvolit Variantu 1 v případě, že postačuje nižší dojezd, a Variantu 3 v případě, že požaduje vyšší dojezd, překážkou není vysoká prvotní investice a předpokládá využití akumulátorů i po ukončení provozu elektromobilu.

Citovaná literatura

- [1] 2003 Suzuki Ignis 1.5 4×4 car specifications. *Carfolio.com* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.carfolio.com/specifications/models/car/?car=134475>
- [2] Suzuki Swift specifications. *Suzuki AM* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: http://www.suzuki.am/img/Swift_specifications_ENG.pdf
- [3] Suzuki Ignis 1.5 4×4 (2003). *Carinf.com* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <http://www.carinf.com/en/55e0412821.html>
- [4] Forces acting on body moving on an inclined plane. *The Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/inclined-planes-forces-d_1305.html
- [5] SCHMIDT, Tobias a Dirk SCHLENDER. Untersuchung zum saisonalen Reifenwechsel unter Berücksichtigung technischer und klimatischer Aspekte. [online]. Bergische Universität Wuppertal, 2003, s. 10 [cit. 2020-02-05].
- [6] IRIMESCU, A., L. MIHON a G. PADURE. Automotive transmission efficiency measurement using a chassis dynamometer. In: *International Journal of Automotive Technology* [online]. 2011, s. 555-559 [cit. 2020-02-05].
- [7] Elektrické vozy metra – technické údaje vozů. *Metroweb.cz* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://metroweb.cz/metro/VOZIDLA/tech-vozy.htm>
- [8] DUDEK, Milan. *Vývojové trendy trakčních motorů*. Plzeň, 2013. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14193/1/BP%2Bprilohy_Dudek.pdf. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Ing. Roman Pechánek, PhD.
- [9] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. V Praze: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [10] Alltrax SR Series Motor Controllers. *Alltrax, Inc.* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://alltraxinc.com/product/sr-series/>
- [11] H2 controller. *ZTP S.r.l.* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.ztp.it/en/overview.php?app=&batteria=&capacita=¯o=&prod=H2>
- [12] Regulátory otáček sériových motorů. *UHS Jakos* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.zapiservice.cz/kategorie/pulzni-regulatory-a-menice-otacek/regulatory-otacek-seriovych-motoru/>
- [13] Kelly KDZ – Brushed DC Series/PM Motor Controller (12V-120 V) (200A-550A). *Kellycontroller.com* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.kellycontroller.com/shop/kdz/>
- [14] SR Series Operators Manual. *ElectricMotorSport.com* [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: https://www.electrimotorsport.com/downloads/dl/file/id/51/product/1058/alltrax_sr_series_controller_manual.pdf

- [15] PowerpaK. *Sevcon* [online]. [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/powerpak/>
- [16] PowerpaK series user manual. *Flight Systems Industrial Products* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.fsip.biz/Documents/Sevcon%20PowerpaK%20Series%20Manual%20%E2%80%93%20with%20Calibrator%20Section.pdf>
- [17] Direct current motors. *Schabmüller* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.schabmueller.de/en/direct-current-motors/>
- [18] Warp 9 DC motor. *EV West* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=8&products_id=49
- [19] Motor information. *NetGain, Inc.* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.go-ev.com/motors-warp.html#WarP_9
- [20] D&D ES-15A-6 Motor & Mounting Bracket. *EVDives.com* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.evdrives.com/product_p/mot-es-15a-6.htm
- [21] Gen4 DC. *Sevcon* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/gen4-dc/>
- [22] Motenergy ME1003 PMDC Motor. *ElectricMotorSport.com* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motors/brushed-motors/rt200-me1003-pmdc-motor-12-72v-15-4-hp-cont-30-8-hp-pk.html>
- [23] Elektromotor Balkancar EV 717. *Sbazar* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.sbazar.cz/cbtyprodej/detail/66516872-elektromotor-balkancar-ev-717>
- [24] VARATICEANU, Bogdan Dumitru, Paul MINCIUNESCU, Silviu Stefan MATEI a Constantin NICOLESCU. Optimization and validation of a 10 kW permanent magnet brushless motor for small electric vehicles. In: *2017 Electric Vehicles International Conference (EV)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-5 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1109/EV.2017.8242095. ISBN 978-1-5386-2382-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8242095/>
- [25] 2012 Tesla Model S Road Test Specs. *Edmunds.com* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.edmunds.com/tesla/model-s/2012/road-test-specs1.html>
- [26] AC-20 72 V 650 A metric peak graph. *HPEVs.com* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://www.hpevs.com/Site/power_graphs/metric/peak/pdf/ac-20/72-volt/650-amp/ac-20%2072%20volt%20650%20amp%20peak%20metric.pdf
- [27] Curtis 1238-6501 HPEVS AC-20 Brushless AC Motor Kit – 72 Volt. *EVWest.com* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=8&products_id=339&osCsId=6jn0aocop7esnjc60p1moub32
- [28] Curtis SE Series Datasheet. *Curtis Instruments* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://cdn.curtisinstruments.com/products/datasheets/SESeries_datasheet_en.pdf
- [29] Motenergy ME1114. *Motenergy.com* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <http://www.motenergy.com/me1114.html>

- [30] Interface to Sin/Cos Encoders With High-Resolution Position Interpolation. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/tidua05a/tidua05a.pdf?ts=1588203582437>
- [31] Golden Motor. *GoldenMotor.com* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.goldenmotor.com/>
- [32] Golden Motor HPM72-10000 Dynamic Test. *GoldenMotor.com* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.goldenmotor.com/eCar/HPM72-10000.pdf>
- [33] Sevcon Gen4. *Sevcon.com* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/gen4/>
- [34] FISCHER, Michael, Mathew WERBER a Peter V. SCHWARTZ. Batteries: Higher energy density than gasoline?. *Energy Policy* [online]. 2009, **37**(7), 2639-2641 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.02.030. ISSN 03014215. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421509001323>
- [35] Energy consumption of full electric vehicles cheatsheet. *Electric Vehicle Database* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>
- [36] Lead-based Batteries Information. *Battery University* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [37] Trakční baterie Varta Professional Dual Purpose 140 Ah. *Battery Import* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/dual-purpose--wet-2/trakcni-baterie-varta-professional-deep-cycle-140ah--20h-12v--lfd140/>
- [38] Varta Professional Deep Cycle. *Varta Automotive* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.varta-automotive.cz/cs-cz/vyrobky/varta-professional-deep-cycle-agm/830-150-090>
- [39] Trakční baterie Varta AGM Professional 830 150 090 (150 Ah). *Battery Import* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/deep-cycle-agm/trakcni-baterie-varta-professional-dc-agm-150ah--20h-12v/>
- [40] Autobaterie BARS 44Ah, 12V, 380A. *Battery Import* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/autobaterie-bars-pro-osobni-vozy/autobaterie-bars-44ah--12v--380a--207x175x175mm-bezudrzbovy/>
- [41] Charging Information for Lead Acid Batteries. *Battery University* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/charging_the_lead_acid_battery
- [42] Delta-Q QuiQ 1500 W. *Delta-Q* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://delta-q.com/product/qui-q-1500-industrial-battery-charger/#>
- [43] QuiQ 1500. *UHS Jakos* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.zapiservice.cz/produkty/qui-q-1500/>
- [44] Zivan NG7 High Frequency Battery Charger. *Zivan.it* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.zivan.it/en/prodotti/pdf/NG7.pdf>

- [45] NG5 CAN. *UHS Jakos* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.zapiservice.cz/produkty/ng5-can/>
- [46] Nickel-based Batteries Information. *Battery University* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries
- [47] Tesla Module Controller. *EVTV Motor Verks* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://media3.ev-tv.me/TeslaModuleController.pdf>
- [48] Panasonic NCR18650B Specs. *Batteryspace* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>
- [49] Types of Lithium-Ion Batteries. *Battery University* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [50] Winston článek Lithium Yttrium LiFePO4/LiFeYPO4 3,2 V 160 Ah. *Battery.cz* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/winston-clanek-lithium-yttrium-lifepo4-lifeypo4-akumulator-3-2v-160ah.html>
- [51] Základní balanční modul BS1V3 na 3,2 V článek. *Battery Import* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.battery-import.cz/gwl-power-lithium/zakladni-balancni-modul-bs1v3-na-3-2v-clanek/>
- [52] BMS bluetooth from 10S to 24S 300A with LCD screen. *Kit-elec-shop.com* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.kit-elec-shop.com/gb/bms/2350-bms-bluetooth-from-10s-to-24s-300a-with-lcd-screen.html>
- [53] Nabíječka 72V/35A pro LiFePO4 / LiFeYPO4. *Eskutr.cz* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://eskutr.cz/nabijecky/132-nabijecka-72v-35a-lifepo4-lifeypo4.html>
- [54] How the braking system works. *How a car works* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.howacarworks.com/basics/how-the-braking-system-works>
- [55] Electric Braking Kit. *EVSource.com* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://evsource.com/collections/vehicle-accessories/products/electric-braking-kit?variant=20216676810825>
- [56] Solární panel polykrystalický Victron Energy 115Wp/12V. *Ecoproduct.cz* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.ecoproduct.cz/solarni.panely/solarni.panely/fotovoltaicke.solarni.panely/solarni.panel.polykrystalicky.victron.energy.115wp.12v>
- [57] Monitor stavu baterie BMV 700. *Eskutr.cz* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://eskutr.cz/elektricka-vozidla/1055-monitor-stavu-baterie-bmv-700.html>
- [58] Elektrická vodní pumpa Davies Craig 12V (80l/min). *Highperformanceparts.cz* [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.highperformanceparts.cz/elektricka-vodni-pumpa-davies-craig-12v-80lm.6198>
- [59] Sevcon Gen4 S4 72-80V 350A. *ElectricMotorSport.com* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.electricmotorsport.com/ev-parts/controllers/brushless-motor-controllers/sevcon-gen4-36-48-275-948.html>

- [60] Scissor Lift Battery Charger Delta Q QuiQ 1500 Series 48v 18 Amp. *Battery Pete* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.batterypete.com/big-batteries/floor-scrubber-and-fork-lift-batteries/floor-scrubber-and-fork-lift-battery-chargers/scissor-lift-battery-charger-delta-q-qui-q-1500-series-48v-18amp-onboard-914480001/>
- [61] American Wire Gauge Chart and Current Limits. *Powerstream.com* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm
- [62] Měděný kabel Simplex, průřez 50mm². *Topbattery* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.topbattery.cz/medeny-kabel-simplex-pruzez-50mm2.html>
- [63] Ke stažení – ceníky. *Energie ČS* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.energie-cs.cz/cs/domacnosti/informace/ke-stazeni>
- [64] GWL-Power-POW72V32A-BMS Specification. *EV-Power.eu* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://files.ev-power.eu/inc/_doc/attach/StoItem/2031/GWL-Power-POW72V35A-BMS_Spec.pdf
- [65] EVC Group – Historie. *EVC Group* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.evgroup.cz/o-nas/z-nasi-historie/>
- [66] ZeroEV - Conversion Service. *Zero EV* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://zero-ev.co.uk/conversion-service/>
- [67] This Dutch company will electrify your vintage Porsche. *Driving.ca* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://driving.ca/porsche/auto-news/news/this-dutch-company-will-electrify-your-vintage-porsche>
- [68] Emise 1.7.2020 - Dluhopis Republiky. *Ministerstvo financí ČR - Spořicí státní dluhopisy* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.sporicidluhopisycr.cz/cs/odluhopisech/urokove-sazby/dluhopis-republiky/emise-1-7-2020-1204>

Seznam příloh

Příloha 1 – Fotografie motorového prostoru po demontáži motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

Příloha 2 – Fotografie motorového prostoru po demontáži motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

Příloha 3 – Demontáž spalovacího motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

Příloha 4 – Demontáž spalovacího motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

Příloha 5 – Demontovaný spalovací motor (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

Příloha 6 – Schéma zapojení kontroléru Alltrax SR-72400 (zdroj: electricmotorsport.com)

Příloha 7 – Nákres sériového motoru 8 kW (zdroj: bestmotor.it)

Příloha 8 – Schéma zapojení kontroléru Sevcon PowerpaK (zdroj: fsip.biz)

Příloha 9 – Nákres PMDC motoru Motenergy ME1003 (zdroj: motenergy.com)

Příloha 10 – Nákres PMSM Motenergy 1114 (zdroj: motenergy.com)

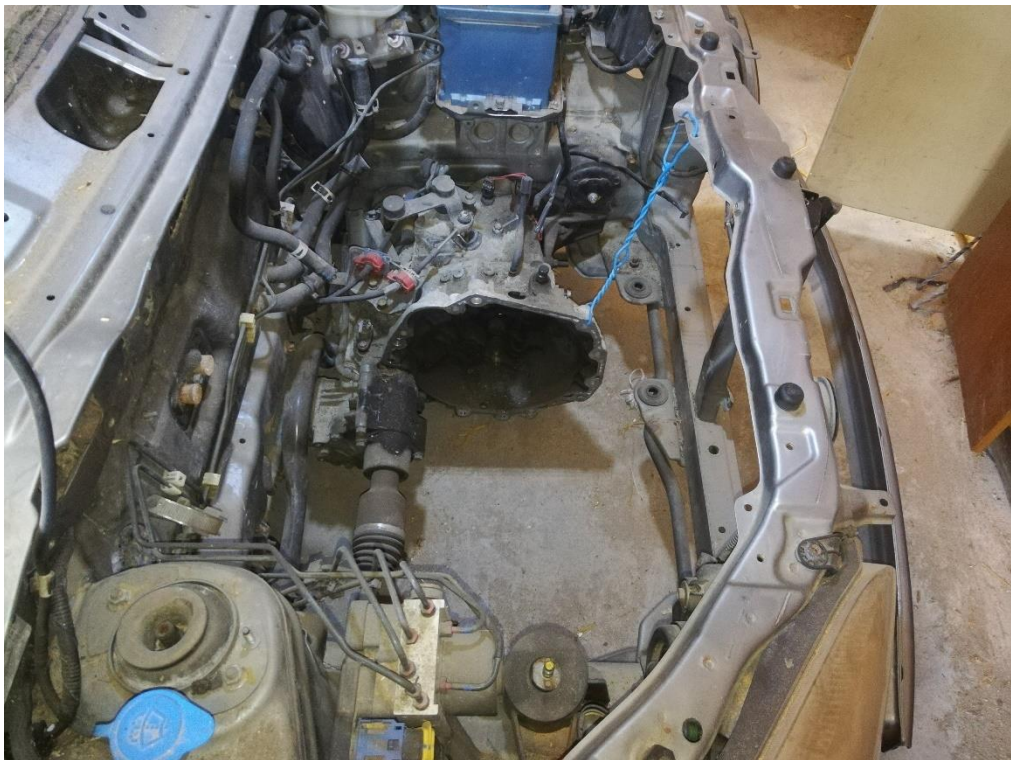
Příloha 11 – Graf výkonu, účinnosti aj. motoru ME1114; vodorovná osa značí zátěžný moment v lb×in, $1 \text{ lb} \times \text{in} = 0,113 \text{ N} \times \text{m}$ (zdroj: motenergy.com)

Příloha 12 – Naměřená data motoru HPM72-10000 (zdroj: goldenmotor.com)

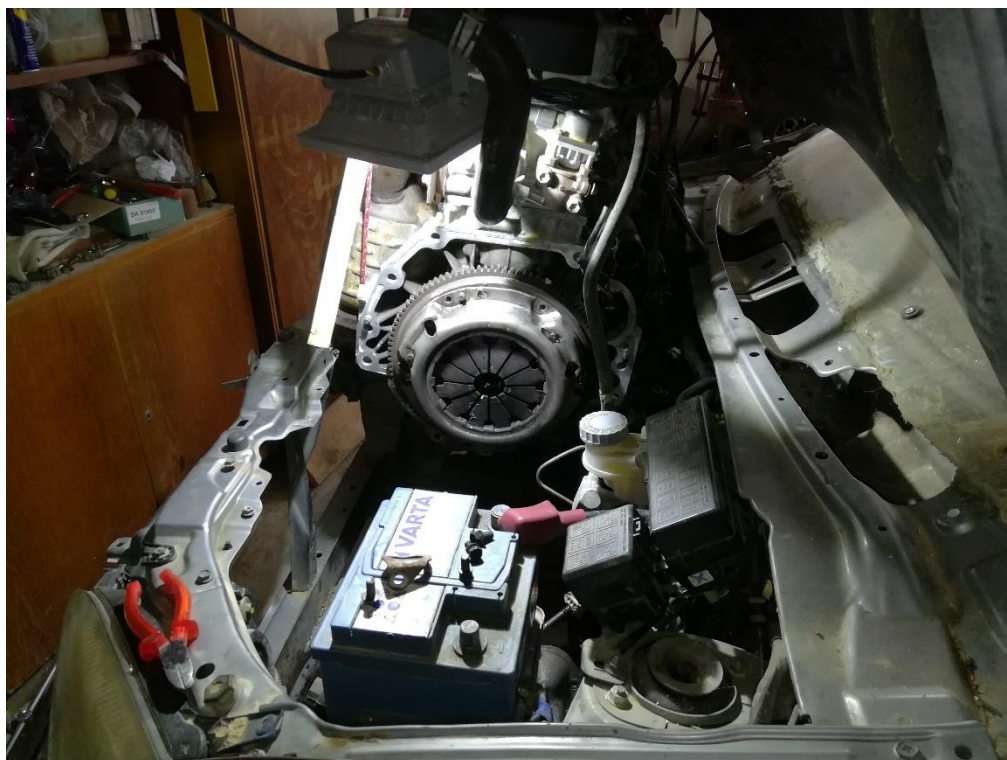
Přílohy



Příloha 1 – Fotografie motorového prostoru po demontáži motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)



Příloha 2 – Fotografie motorového prostoru po demontáži motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)



Příloha 3 – Demontáž spalovacího motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

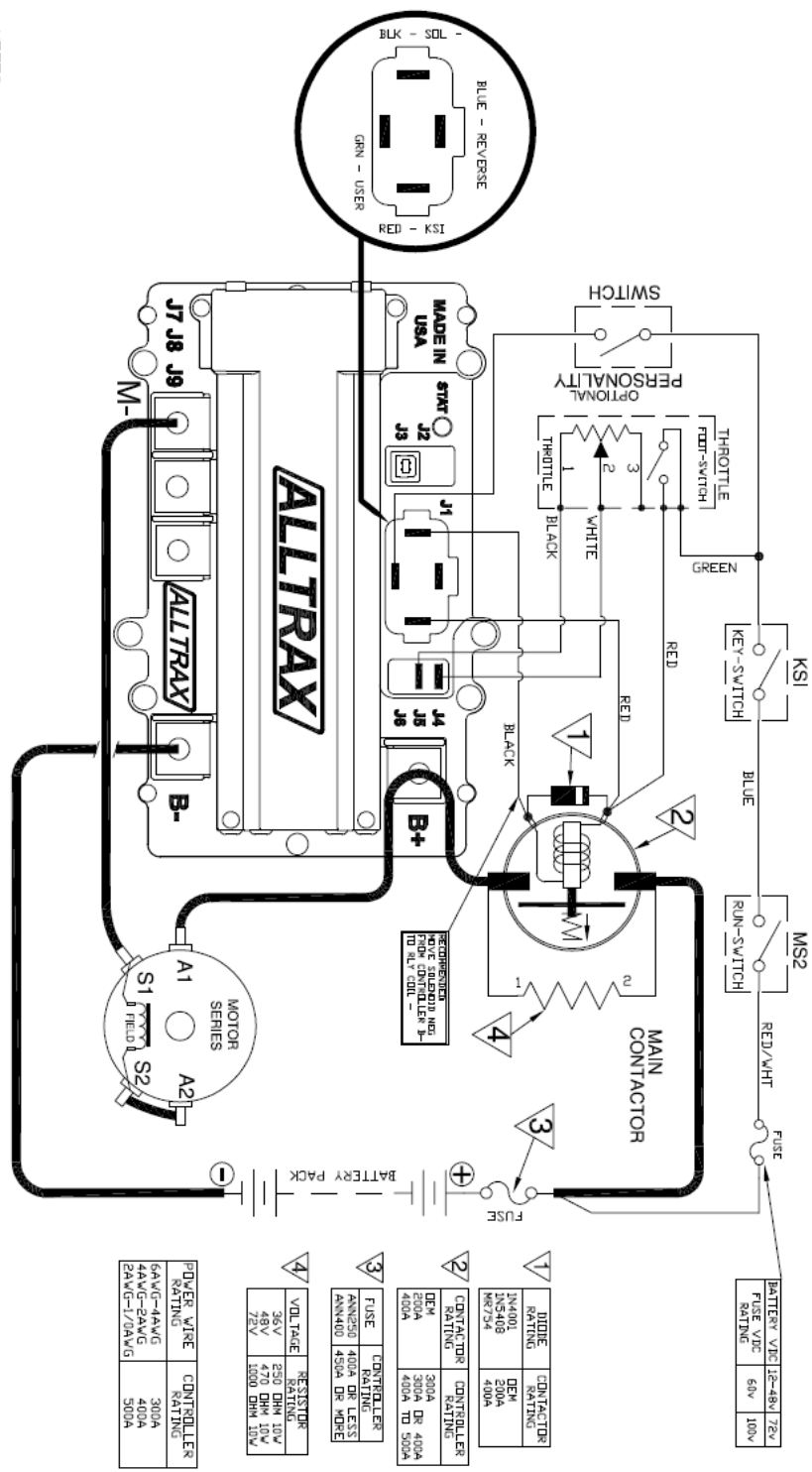


Příloha 4 – Demontáž spalovacího motoru (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)



Příloha 5 – Demontovaný spalovací motor (zdroj: Ing. Miroslav Vitek, CSc.)

SR - GENERIC WIRING NO REVERSE

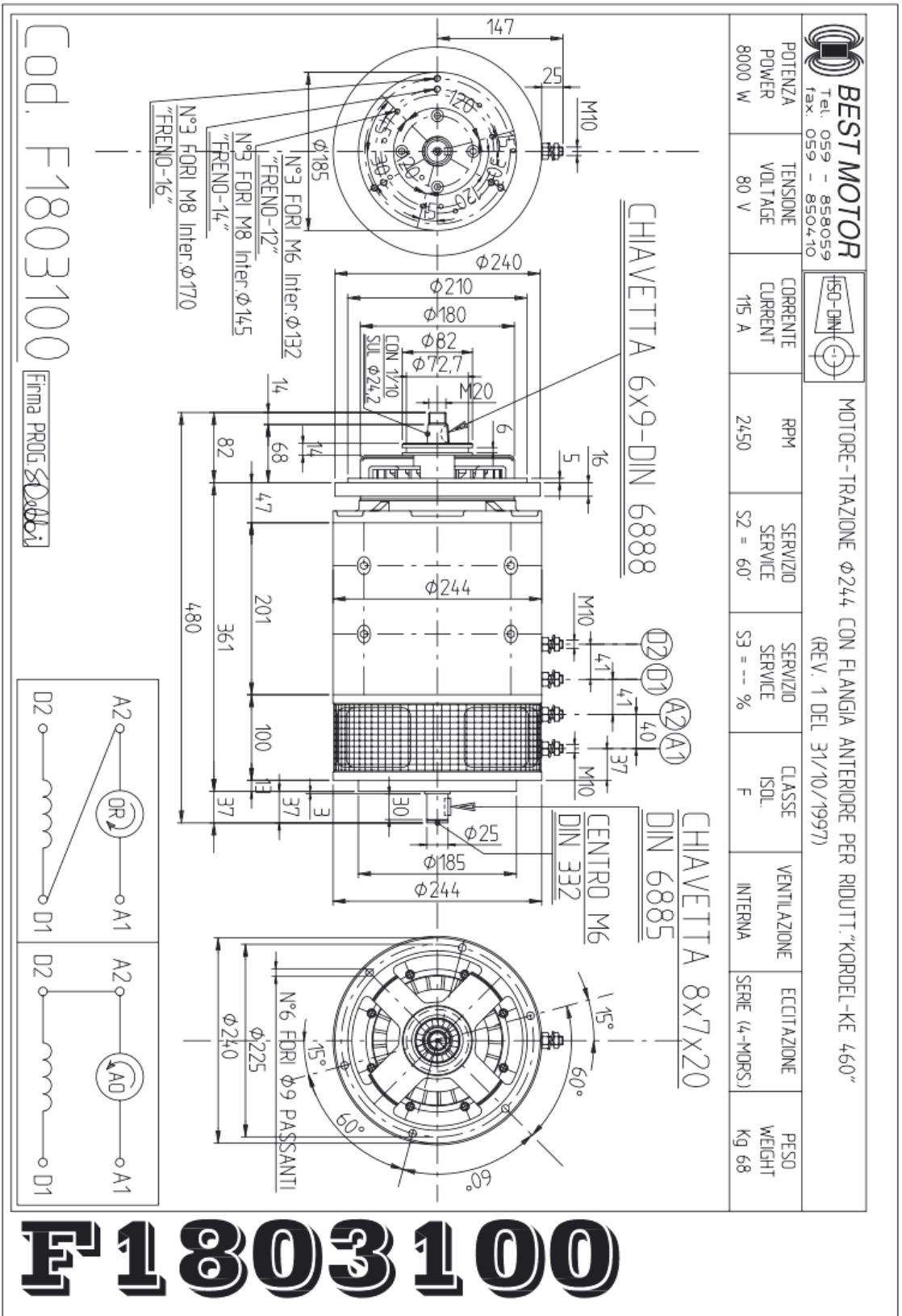


- NOTES:**
- * FUSES REQUIRED FOR ALL INSTALLATIONS
 - * BIDDIE REQUIRED ADDRESS COILS / RELAYS
 - * KSI IS REQUIRED TO BE A SWITCHED INPUT, NOT RESISTIVE
 - > ALLTRAX RESERVES THE RIGHT TO CHANGE DOCUMENTATION WITHOUT NOTICE
 - > ALLTRAX MAKES NO WARRANTY AS TO THE ACCURACY, SUFFICIENCY OR SUITABILITY OF ANY TECHNICAL OR OTHER INFORMATION PROVIDED
 - > SEE OPERATORS MANUAL FOR MORE INFORMATION

REVISIONS		DWG SCALE		NTS	
REV.	ECO.	DATE	DRAWN	R. CSIK	03/31/16
A	03/30/16	03/30/16	RC	RC	
B	03/22/17	03/22/17	RC	RC	

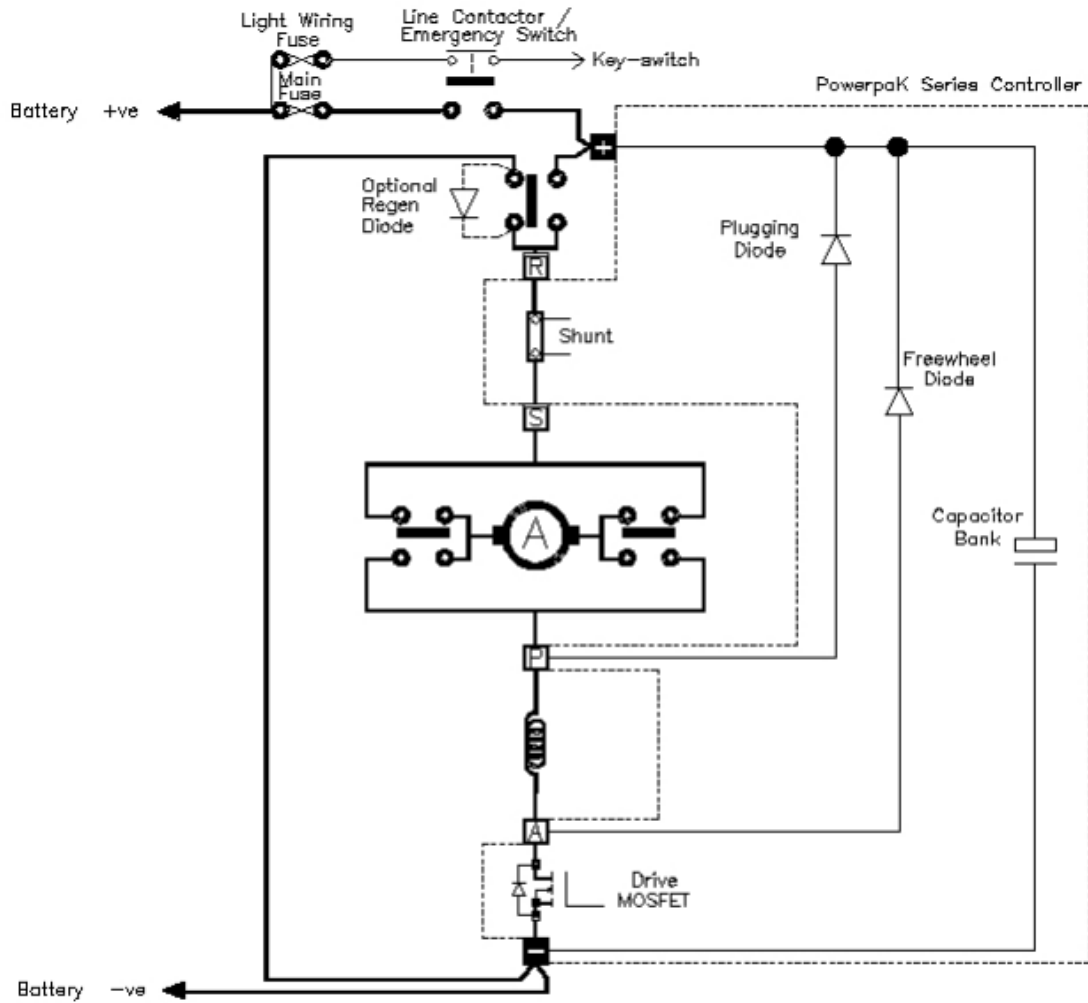
ALLTRAX 1111 Cherry Creek Rd. Grants Pass, OR 97527 PHONE: (541) 476-3565	
TITLE SR to Generic Series No Reverse Wiring Diagram	
SIZE	DOCUMENT NO.
A	S
FILENAME: sr-generic-series-no-rev-wir-cs-sheet	1 of 1

Príloha 6 – Schéma zapojení kontroléru Alltrax SR-72400 (zdroj: electricmotorsport.com)



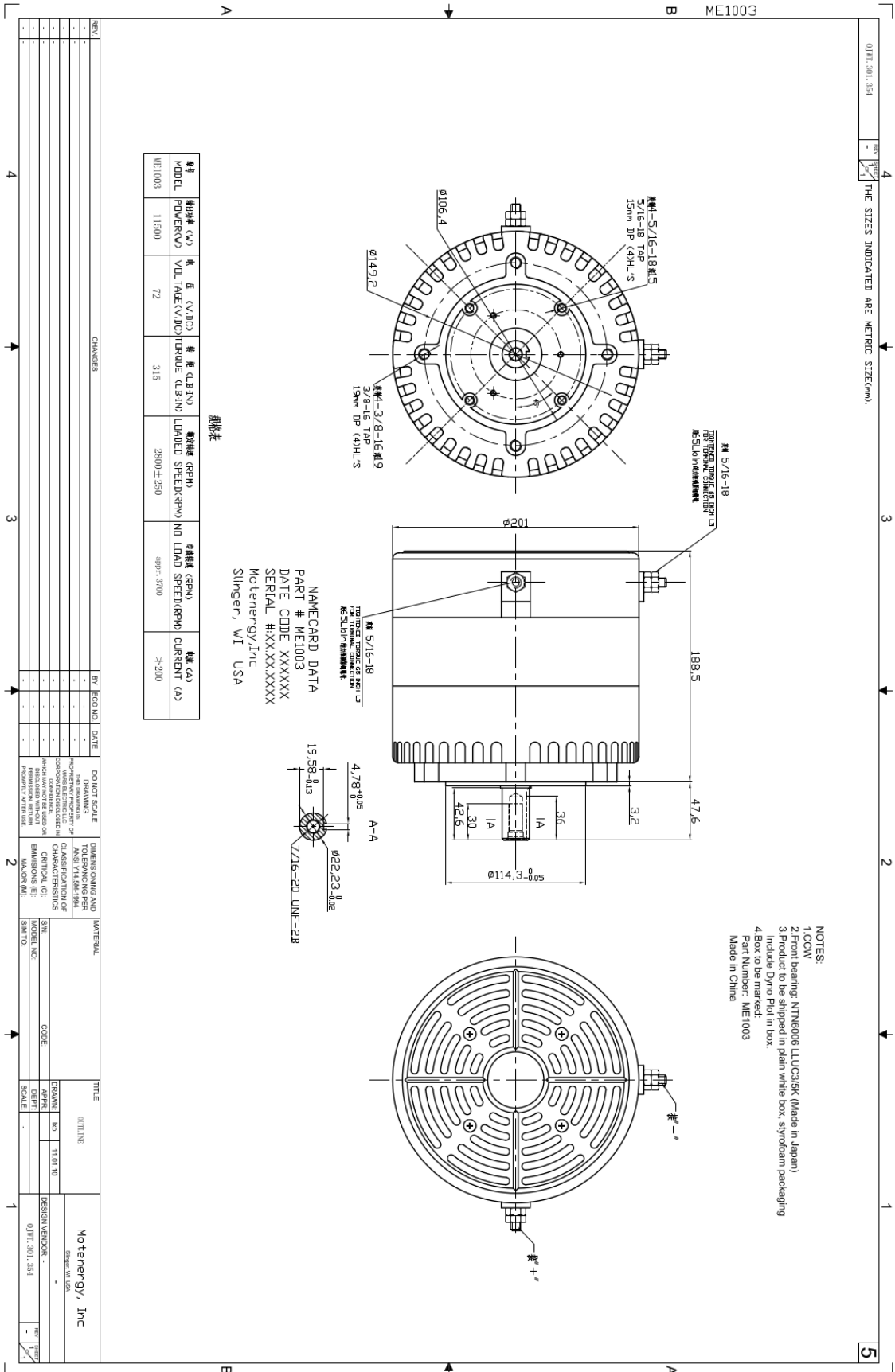
Príloha 7 – Nákres sériového motoru 8 kW (zdroj: bestmotor.it)

Figure 4 Series Traction Regen



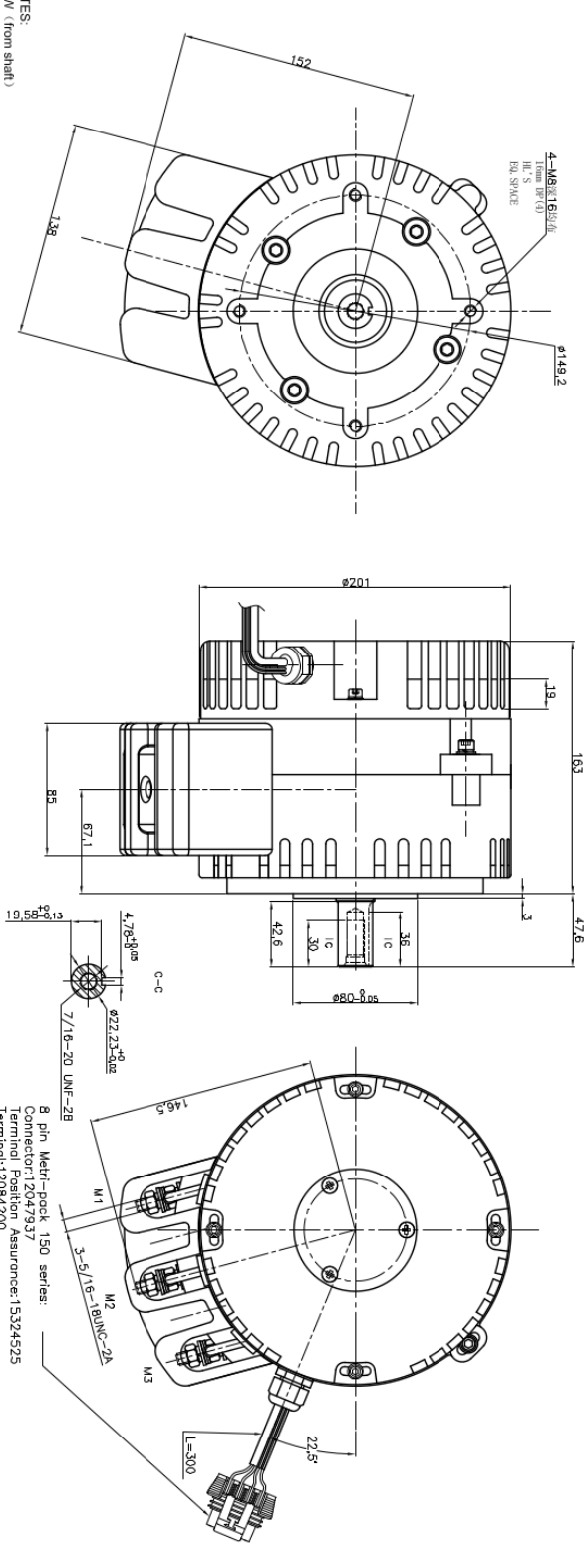
Note: When an emergency battery disconnect switch is fitted, the key switch must be fed through an auxiliary switch to prevent overvoltage damage due to disconnection during regen.

Příloha 8 – Schéma zapojení kontroléru Sevcon PowerpaK (zdroj: fsip.biz)



Príloha 9 – Nákres PMDC motoru Motenergy ME1003 (zdroj: motenergy.com)

01WT_301_021 THE SIZES INDICATED ARE METRIC SIZES(mm) 图中所标尺寸均为米制尺寸:mm



NOTES:
 1 CW (from shaft)
 2 TURNS IS 20 PER PHASE
 3 Front bearing: NTN6006 LLUC3/6K (Made in Japan)
 4 USE RLS(www.rls.si) ENCODER sine/cosine encoder-RMB29AC01SS1 magnetic actuator-RMH06A3A02
 5 Product to be shipped in plain white box, styrofoam packaging include Dyno Pilot in box.
 6 Box to be marked: Part Number: ME1114 REV-A Made in China

NAMECARD DATA
 PART # ME1114 REV-A
 DATE CODE XXXXXX
 SERIAL #:XX.XX.XXXX
 Motenergy, Inc.
 Slinger, WI USA

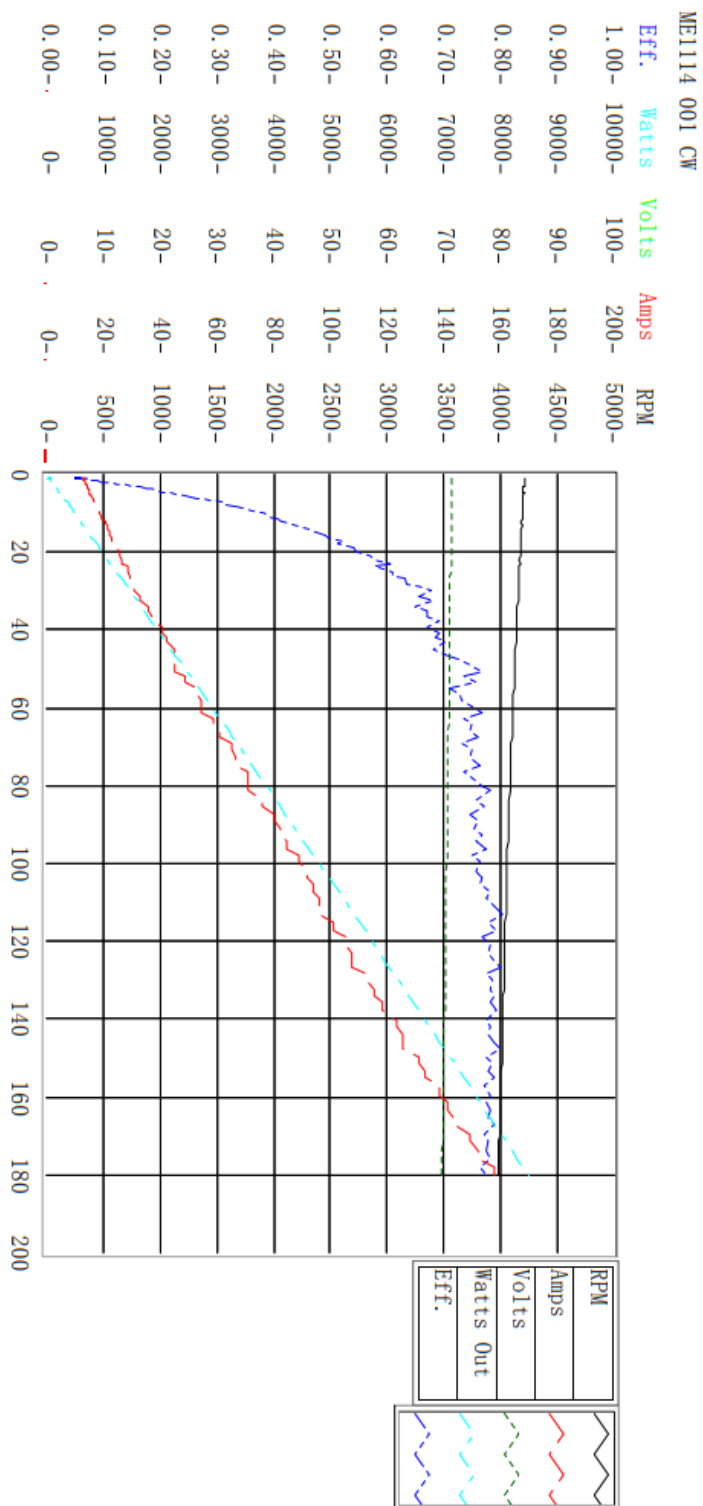
1.sine/cosine encoder

PN	LOCATION	WIRE DESIGNATION	WIRE COLOR
插孔点	引线标识	引线颜色	引线颜色
A	Sine (正弦)	WHITE	白色
B	Cosine (余弦)	WHITE	白色
C	Ground (0)	BLACK	黑色
D	VCC		
E	Vcc (+5V)	RED	红色
F	Sine (正弦)	GREEN	绿色
G	Ground	WHITE	白色
H	0V		

7 Magnet: 150 °C
 8 Sensor Timing with BEMF: oscilloscope probe attached to M1 and ground probe attached to M2, the BEMF rising edge zero cross should lead the sine wave (sensor pin A to sensor pin C) and zero cross by 20 electrical degrees of the BEMF waveform. Alternatively if timing the sensor using a Sevcon controller, the encoder position should be within +/-3 degrees of 0
 9 Motor Phase Resistance is 0.0060
 10 Motor Inductance at 100Hz is 0.0082mH
 11 Sensor magnet is to be 2.5mm to 3mm from the sensor mounting face. The minimum amplitude for the sensor is 2 volts AC peak to peak.
 12 Class H insulation system.

REV	DESCRIPTION	DATE	BY	ECN NO.	CHANGES
A	shorten the coding bits to 72	2013-11-24	DF	520313-4	
	DO NOT SCALE				
	DRAWING APPROVED BY REPRESENTATIVE OF CLASS OF ENGINEERS				
	CRITICAL (C)				
	EMISSIONS (E)				
	MAJOR (M)				
	SCALE				
	TITLE	01WT_301_021			
	Motenergy, Inc.				

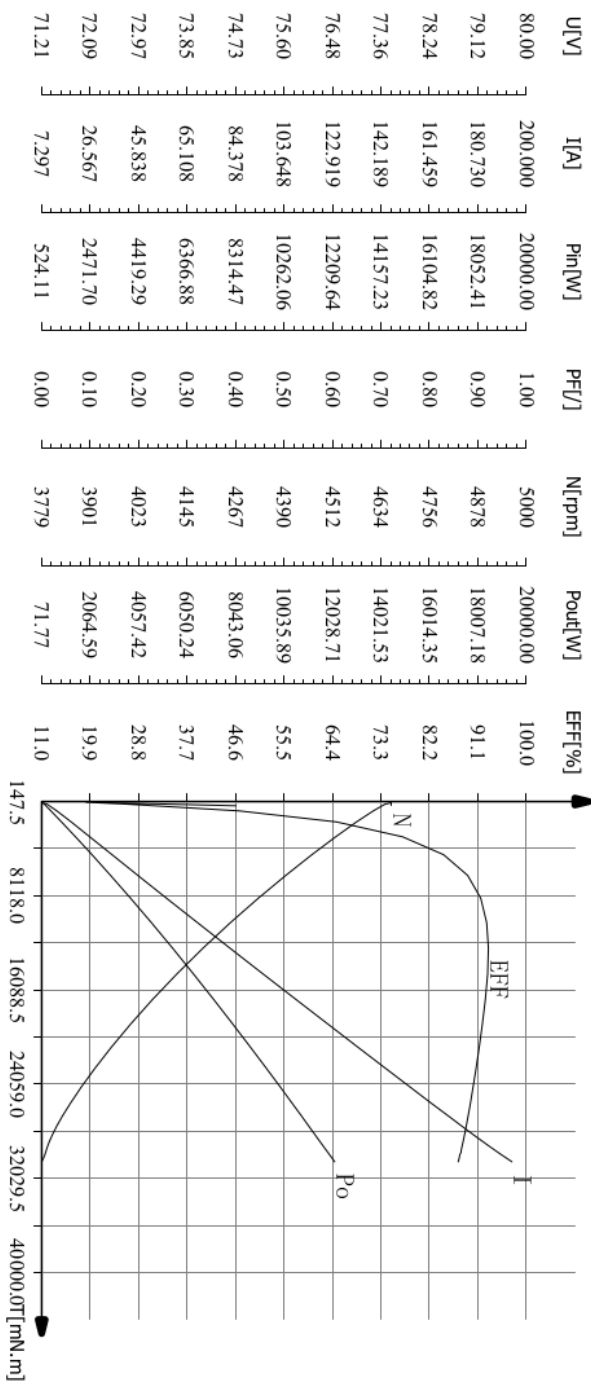
Příloha 10 – Nákres PMSM Motenergy 1114 (zdroj: motenergy.com)



Příloha 11 – Graf výkonu, účinnosti aj. motoru ME1114; vodorovná osa značí zátěžný moment v lb×in, 1 lb×in = 0,113 N×m (zdroj: motenergy.com)

type: HPM72-10000 NO.: G20130522004 operator: 001 date: 2013-5-22

GOLDEN MOTOR Motor test curve



Description	voltage(V)	current(A)	P. input(W)	torque(mN.m)	rotate(RPM)	P. output(W)	eFF(%)
Upload point	71.83	7.297	524.11	468.0	4659	228.32	43.6
Most efficiency point	71.39	82.071	5858.31	12539.8	4186	5450.05	93.0
Max Po. point	71.32	194.231	13853.12	30626.3	3779	12118.59	87.5
Max torque point	71.32	194.231	13853.12	30626.3	3779	12118.59	87.5
End point	71.32	194.243	13854.35	30627.5	3779	12119.51	87.5
Rated rotate point	71.32	194.231	13853.12	30626.3	3779	12118.59	87.5

Příloha 12 – Naměřená data motoru HPM72-10000 (zdroj: goldenmotor.com)