

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh uspořádání pohonných systémů elektromobilu

Autor: **Vojtěch PROCHÁZKA**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef FORMÁNEK, Ph.D.**

2014 / 2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch PROCHÁZKA**
Osobní číslo: **S12B0063K**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Návrh uspořádání pohonných systémů elektromobilu**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Cílem je provést rozbor technického uspořádání pohonného systému v oblasti elektricky poháněných silničních vozidel, provést specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost a technickou jednoduchost. Výsledné řešení je v návrhu koncepčního řešení celkového pohonného systému, včetně zhodnocení navržených technických parametrů.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Vypracování rešerše včetně systematického popisu funkce.
2. Vypracování rozboru technických parametrů.
3. Vypracování variant koncepčních řešení.
4. Zhodnocení navrženého koncepčního řešení.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

VALA, M., TESAŘ, M. Teorie a konstrukce silničních vozidel I. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003

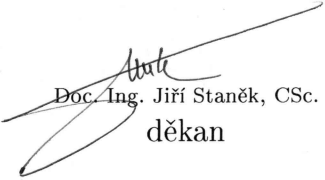
VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2003

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. Automobily - Podvozky. Brno: Avid, 2007

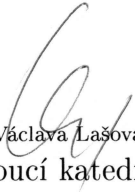
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **22. září 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu a konzultantovi této bakalářské práce doc. Ing. Josefu Formánkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce a za jeho čas věnovaný konzultacím. Zároveň děkuji i mé rodině za každodenní podporu po celou dobu studia a zvláště při vypracování bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|-------------------|---------------------------|
| AUTOR | Příjmení Procházka | Jméno Vojtěch | |
| STUDIJNÍ OBOR | B2301 Dopravní a manipulační technika | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení Doc. Ing. Formánek, Ph.D. | Jméno Josef | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU - FST - KKS | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtně- te |
| NÁZEV PRÁCE | Návrh uspořádání pohonných systémů elektromobilu | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKS | ROK ODEVZD. | 2015 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| CELKEM | 71 | TEXTOVÁ ČÁST | 71 | GRAFICKÁ ČÁST | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

| | |
|----------------------|--|
| STRUČNÝ POPIS | <p>Bakalářská práce obsahuje rozbor technického uspořádání pohonných soustav elektromobilu. Popisuje jednotlivé části pohonného systému včetně alternativ jejich umístění. Na základě teoretické části a specifikovaných požadavků jsou pak jednotlivé prvky rámcově výpočtově dimenzovány a jsou navrženy tři kompletní koncepce elektromobilů.</p> |
| KLÍČOVÁ SLOVA | <p>elektromobil, pohonná soustava, elektromotor, akumulátor, mechanika jízdy vozidla, návrh uspořádání</p> |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | |
|--------------------------|---|------------------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Procházka | Name Vojtěch | |
| FIELD OF STUDY | B2301 "Transport and handling machinery" | | |
| SUPERVISOR | Surname Doc. Ing. Formánek, Ph.D. | Name Josef | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKS | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Design of arrangement drive systems in electric car | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Machine Design | SUBMITTED IN | 2015 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 71 | TEXT PART | 71 | GRAPHICAL PART | 0 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|--------------------------|--|
| BRIEF DESCRIPTION | This bachelor thesis analyses technical arrangement of drive systems in electric cars. It describes the parts of the drive system including their location alternatives. Based on the theoretical part and specified requirements, the individual elements are generally computationally dimensioned and three complete concept of electric cars are designed. |
| KEY WORDS | electric car, drive system, electric motor, battery, drive mechanics of car, layout design |

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam obrázků | 7 |
| Seznam tabulek | 8 |
| Úvod | 10 |
| 1 Elektromobily – teoretický základ pro rozbor technického uspořádání pohonného systému..... | 11 |
| 1.1 Úvod do elektromobility..... | 11 |
| 1.2 Obecná charakteristika elektromobilu | 11 |
| 1.2.1 Obecné schéma pohonné soustavy elektromobilu | 12 |
| 1.3 Historie elektromobility..... | 12 |
| 1.3.1 Od prvního EV do 60. let 20. století | 12 |
| 1.3.2 2. polovina 20. století | 14 |
| 1.3.3 Přelom 20. – 21. století..... | 15 |
| 1.3.4 Koncepce současných EV | 16 |
| 1.4 Elektromotory a jejich využitelnost v EV | 25 |
| 1.4.1 Přehled druhů elektromotorů..... | 25 |
| 1.4.2 Specifikace požadavků na pohonnou jednotku vozidla | 25 |
| 1.4.3 Střídavé elektromotory (AC)..... | 27 |
| 1.4.4 Stejnosměrné elektromotory (DC) | 28 |
| 1.4.5 Elektromotory užívané pro pohon vozidel, konkrétní aplikace | 28 |
| 1.5 Akumulátory pro elektrická vozidla | 28 |
| 1.5.1 Základní charakteristika akumulátoru | 28 |
| 1.5.2 Druhy akumulátorů pro EV | 29 |
| 1.5.3 Způsoby dobíjení akumulátorů..... | 29 |
| 1.6 Uspořádání pohonných systémů již navržených elektromobilů | 30 |
| 1.6.1 Umístění akumulátoru | 30 |
| 1.6.2 Umístění řídicí jednotky, případně střídače | 30 |
| 1.6.3 Umístění elektromotoru..... | 31 |
| 1.6.4 Umístění převodovky, diferenciálu | 31 |
| 1.6.5 Poháněná kola | 31 |
| 2 Koncepční řešení uspořádání pohonných soustav elektromobilu | 33 |
| 2.1 Koncepce č. 1 - malý městský elektromobil..... | 33 |
| 2.1.1 Charakteristika | 33 |
| 2.1.2 Požadavky na pohonnou soustavu vozidla..... | 33 |
| 2.1.3 Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1.4 | Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů | 40 |
| 2.1.5 | Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů | 42 |
| 2.2 | Koncepce č. 2 – elektromobil vyšší střední třídy | 42 |
| 2.2.1 | Charakteristika | 42 |
| 2.2.2 | Požadavky na pohonnou soustavu vozidla..... | 43 |
| 2.2.3 | Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky | 44 |
| 2.2.4 | Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů | 48 |
| 2.2.5 | Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů | 49 |
| 2.3 | Koncepce č. 3 – užitkový elektromobil | 50 |
| 2.3.1 | Charakteristika | 50 |
| 2.3.2 | Požadavky na pohonnou soustavu vozidla..... | 50 |
| 2.3.3 | Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky | 51 |
| 2.3.4 | Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů | 55 |
| 2.3.5 | Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů | 56 |
| 2.4 | Zhodnocení navržených parametrů | 57 |
| | Závěr..... | 58 |
| | Použitá literatura | 59 |
| | PŘÍLOHA č. 1 | 62 |
| | PŘÍLOHA č. 2..... | 66 |

Seznam obrázků

| | | |
|------------|---|----|
| Obrázek 1 | Obecné schéma pohonné soustavy EV | 12 |
| Obrázek 2 | EV Tesla S [5] | 12 |
| Obrázek 3 | Baker EV [8]..... | 13 |
| Obrázek 4 | Batronic Minivan Electric Delivery Van [10 str. 37] | 14 |
| Obrázek 5 | Schéma uspořádání pohonné soustavy Batronic Minivan Electric Delivery Van. | 14 |
| Obrázek 6 | GM EV1 [12]..... | 15 |
| Obrázek 7 | Schéma uspořádání pohonných soustav GM EV1..... | 15 |
| Obrázek 8 | Graf prodejnosti společností prodávajících EV, data pro USA za 06/2014 [14].... | 16 |
| Obrázek 9 | Schéma uspořádání pohonných soustav EV TESLA model S | 18 |
| Obrázek 10 | Schéma uspořádání pohonných soustav EV TESLA P85D..... | 18 |
| Obrázek 11 | Ilustrativní rozstřel jednotlivých částí podvozku EV TESLA model S [15]..... | 18 |
| Obrázek 12 | Nissan Leaf [18] | 19 |
| Obrázek 13 | Schéma uspořádání pohonných soustav EV Nissan Leaf..... | 20 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 14 BMW i3 [22]..... | 20 |
| Obrázek 15 Schéma uspořádání pohonné soustavy BMW i3 REX | 22 |
| Obrázek 16 VW e-Up! [27]..... | 22 |
| Obrázek 17 VW e-Golf [31]..... | 22 |
| Obrázek 18 Schéma uspořádání pohonné soustavy VW e-Golf | 23 |
| Obrázek 19 SRI EV1 Buggy [32] | 23 |
| Obrázek 20 SRI EV1 Buggy - pohonné ústrojí [32] | 23 |
| Obrázek 21 Schéma uspořádání pohonné soustavy SRI EV1 Buggy | 24 |
| Obrázek 22 Ideální charakteristika pohonu $P(n)$ | 26 |
| Obrázek 23 Ideální charakteristika pohonu $M(n)$ | 26 |
| Obrázek 24 Stator asynchronního elektromotoru [36]..... | 27 |
| Obrázek 25 Rotor asynchronního elektromotoru - klecová kotva [36]..... | 27 |
| Obrázek 26 Asynchronní elektromotor [36] | 27 |
| Obrázek 27 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 38 |
| Obrázek 28 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 39 |
| Obrázek 29 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 1 | 41 |
| Obrázek 30 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 1 - alternativní řešení | 41 |
| Obrázek 31 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 46 |
| Obrázek 32 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 47 |
| Obrázek 33 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 2 | 48 |
| Obrázek 34 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 53 |
| Obrázek 35 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení | 54 |
| Obrázek 36 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 3 | 55 |
| Obrázek 37 Valivý odpor pneumatik [38]..... | 63 |
| Obrázek 38 FG-5100 [39] | 63 |
| Obrázek 39 Uspořádání měřících prvků..... | 64 |
| Obrázek 40 Kolo elektromobilu | 64 |
| Obrázek 41 Měření..... | 64 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Technické parametry modelů Tesla S, D | 17 |
| Tabulka 2 Vybrané parametry modelu Nissan Leaf..... | 19 |
| Tabulka 3 Přehled vybraných parametrů BMW i3 | 21 |
| Tabulka 4 Technické údaje SRI EV1 Buggy | 24 |
| Tabulka 5 Rozdělení točivých elektromotorů | 25 |

| | |
|---|----|
| Tabulka 6 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu..... | 33 |
| Tabulka 7 Přehled vypočtených hodnot I..... | 36 |
| Tabulka 8 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 880,5$ N..... | 38 |
| Tabulka 9 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 2550$ N..... | 39 |
| Tabulka 10 Přehled technických údajů koncepce č. 1..... | 42 |
| Tabulka 11 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu..... | 43 |
| Tabulka 12 Přehled vypočtených hodnot I..... | 44 |
| Tabulka 13 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 1312,6$ N..... | 45 |
| Tabulka 14 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 6000$ N..... | 46 |
| Tabulka 15 Přehled technických údajů | 49 |
| Tabulka 16 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu..... | 50 |
| Tabulka 17 Přehled vypočtených hodnot I..... | 51 |
| Tabulka 18 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 2883$ N..... | 52 |
| Tabulka 19 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 4500$ N..... | 53 |
| Tabulka 20 Přehled technických údajů | 56 |
| Tabulka 21 Naměřené hodnoty | 65 |
| Tabulka 22 Intervaly rychlosti pro výpočet převodových poměrů | 67 |
| Tabulka 23 Převodové poměry pro dané intervaly rychlostí | 68 |
| Tabulka 24 Tabulka vypočtených hodnot při působení točivého momentu 200 N . m | 68 |
| Tabulka 25 Tabulka vypočtených hodnot pro točivý moment 225 N . m..... | 69 |
| Tabulka 26 Intervaly rychlosti pro výpočet převodových poměrů | 69 |
| Tabulka 27 Převodové poměry pro dané intervaly rychlostí | 70 |
| Tabulka 28 Tabulka vypočtených hodnot při působení točivého momentu 200 N . m | 70 |
| Tabulka 29 Tabulka vypočtených hodnot pro točivý moment 190 N . m..... | 71 |

Úvod

Práce si klade za cíl provést rozbor technického uspořádání prvků pohonné soustavy elektromobilu. Tento záměr v sobě skrývá množství dílčích úloh, které bude třeba detailněji prozkoumat.

Nejprve bude třeba charakterizovat samotnou oblast, ve které se bakalářská práce bude pohybovat – tedy elektricky poháněná vozidla. Daná kategorie vozidel s sebou nese množství specifických vlastností, které bude potřeba zmínit a charakterizovat. V textu bude nahlédnuto i do historie elektrického pohonu silničních vozidel, kde bude možno zachytit vývoj ať už technických parametrů použitých pohonných prvků, tak i jejich koncepčních řešení.

Samostatná kapitola bude poté věnována jednotlivým částem pohonné soustavy, kde budou popsány jejich funkce, princip činnosti a možné alternativy. V případě elektromobilu budou aktuální především tyto části:

- akumulátor
- elektromotor
- řídicí jednotka, střídač
- mechanické přenosové a transformační části
 - soustava hřídelů
 - diferenciál
 - převodovka
- poháněná kola

Část práce bude věnována i variantám jejich umístění, což dohromady utvoří informační oporu pro návrh vlastní koncepce.

V aplikační části práce budou specifikovány požadavky na různé varianty elektricky poháněných vozidel a na základě těchto požadavků budou tyto varianty navrženy. Během výpočtů se práce dotkne mechaniky jízdy vozidla, kde budou jednotlivé varianty rámcově dimenzovány. Výstupem práce budou vlastní navržené koncepce včetně hodnot stěžejních technických parametrů.

Cílem práce tak nebude provést detailní návrh konkrétního elektromobilu, který bude dle návrhu schopný jízdy, ale prozkoumat jednotlivé části pohonné soustavy z hlediska uspořádání v pohonném systému a s použitím průřezu strojních znalostí plynoucích z bakalářského studia a položit koncepční základ pro návrh elektromobilu spolu s orientačními technickými údaji a posouzením vhodnosti navrženého systému.

1 Elektromobily – teoretický základ pro rozbor technického uspořádání pohonného systému

1.1 Úvod do elektromobility

Pokud se zamyslíme nad tím, jakým rapidním způsobem se zásoby natolik konvenčního paliva jakým je ropa pro naši a zvláště další generaci lidstva ztenčují, pak přichází čas, aby byly zejména v oblastech jejího nejširšího využití, jakým je právě doprava, dovedeny k dokonalosti jiné, efektivnější, ale především trvale udržitelné technologie.

V roce 2040 se předpokládá objemově pouze pětinová produkce ropy oproti současnosti, která již nebude schopna pokrýt stále dynamičtější nárůst počtu dopravních prostředků, a její cena se mnohonásobně zvýší. Další důležité kritérium pro volbu alternativního pohonu představuje dopad na životní prostředí, který je nezbytné snížit na minimum. Přestože emise škodlivých plynů určitou mírou omezil Kjótský protokol (1997) a evropské směrnice EURO, množství všech vyrobených vozidel za rok vzrostl v letech 2000 - 2013 přibližně o 50 %. Počet užívaných vozidel činil dle hodnot z roku 2012 1,15 miliardy [4], v současnosti lze předpokládat dle průměrných posledních přírůstků hodnotu 1,25 miliardy vozidel v provozu.

Takovou technologií, která má potenciál trvale čelit těmto skutečnostem, může být právě pohonná soustava využívající elektrickou energii. Z hlediska míry využití elektřiny pro provoz lze vozidla rozdělit následujícím způsobem:

1. Vozidlo se spalovacím motorem – elektrická energie není využita k pohonu vozidla, pouze ke startování spalovacího agregátu a napájení elektrických zařízení ve vozidle
2. Hybrid
 - a. HEV (z anglického „Hybrid Electric Vehicle“) – elektrická energie je využita kromě předchozího i jako pohonná síla, nabíjení menších baterií se uskutečňuje výhradně přes generátor, který roztáčí hřídel spalovacího motoru
 - i. HEV neschopný výhradně elektrické jízdy – elektromotory dosahují nízkých výkonů, slouží čistě jako pomocná jednotka zvláště ve městě a při prudké akceleraci
 - ii. HEV schopný výhradně elektrické jízdy – elektromotory dosahují vyšších výkonů a jsou schopné po dobití baterie krátké samostatné jízdy
 - b. PHEV (z anglického „Plug-in Hybrid Electric Vehicle“) – charakteristika odpovídá HEV z bodu a., odlišuje se bateriemi s mnohem vyšší kapacitou, které není schopen generátor dobít, musí být dobity z elektrické sítě, zvyšuje se tak razantně dojezd, většina z nich schopna čistě elektrického provozu
3. Elektromobil – zde je spalovací motor plně nahrazen elektrickým, elektrická energie tedy slouží k samostatnému pohonu i napájení všech zařízení ve vozidle, získává se z vysokokapacitních akumulátorů nabíjených z elektrické sítě, právě elektromobil, především uspořádání jeho pohonné soustavy, bude hlavním předmětem zkoumání v této práci

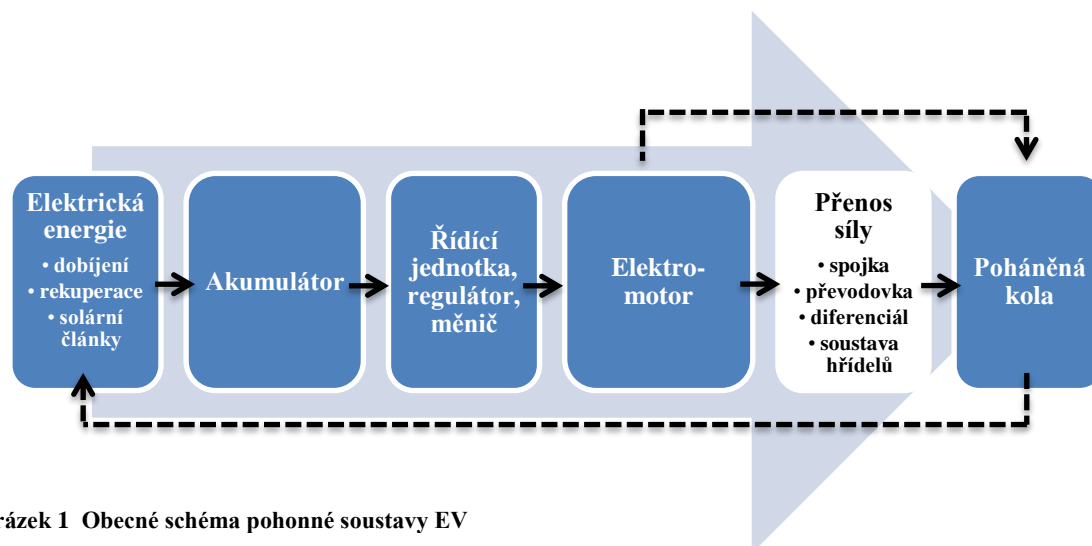
1.2 Obecná charakteristika elektromobilu

Elektromobil, nebo také EV (z anglického „Electric Vehicle“), je tedy vozidlo poháněné elektromotorem. Elektrickou energii, kterou potřebuje pro svůj pohon, primárně získává z akumulátorů. Přísun elektrické energie je řízen pomocí určitého typu regulátoru, který reaguje na pokyny řidiče a dává mu potřebné informace.

Akumulátory mohou být zpravidla dobíjeny několika způsoby:

1. Ze zásuvky běžné elektrické sítě (pomalé)
2. Ze speciálních dobíjecích stanic (rychlé)
3. Z přídatných dobíjecích systémů (pomocné, za jízdy)
 - a. Pomocí solárních článků umístěných na karoserii automobilu
 - b. Pomocí rekuperačního systému brzděné energie

1.2.1 Obecné schéma pohonné soustavy elektromobilu



Obrázek 1 Obecné schéma pohonné soustavy EV

Schéma na obrázku 1 dává přehled o základních obvyklých částech pohonných soustav EV, jejich hrubém uspořádání a možných variantách směru toku energie. Pouze část schématu „Přenos síly“ v bílém rámečku nemusí být součástí všech EV. Z charakteru schématu vyplývá, že zachycuje pouze pohonnou soustavu, další části včetně interiéru a exteriéru vozidla bývají analogické k běžným automobilům se spalovacím agregátem, vyjma některých speciálních prvků příslušících ze své podstaty pouze EV. V příslušných oddílech se tato práce bude detailně zaměřovat na části pohonné soustavy a jejich koncepční uspořádání.



Obrázek 2 EV Tesla S [5]

1.3 Historie elektromobility

Aby mohla být navržena nová, efektivnější řešení pro EV, je nezbytné nahlédnout do historie, seznámit se předchůdci a především se poučit z nedostatků, které vedly k jejich praktickému neúspěchu.

1.3.1 Od prvního EV do 60. let 20. století

V první řadě je důležité si uvědomit, že elektropohon vozidla nepatří mezi nové technologie, ale vyvíjel se již od prvních let 20. století na pozadí vývoje běžných automobilů. Kvůli pro-

blematicke dojezdu a dlouhého dobíjení však toto řešení pro dopravní vozidla zůstávalo po celé století ve stínu spalovacích agregátů. Ropy se zdálo být nevyčerpatelné množství, palivo se jevílo dostupné a relativně laciné. Emise výfukových plynů zpočátku v tak malé produkci vozidel lidstvo příliš nezajímaly. Elektromotory v dopravě vyjma jen některých elektromobilových konceptů našly využití spíše v různých továrních vozíčkách, manipulátorech a kolejových vozidlech.

První potenciálně vhodný stejnosměrný elektromotor pro pohon vozidla vznikl v roce 1886. Jeho aplikace na sebe nenechala dlouho čekat a na přelomu 19. a 20. století existovala již provozuschopná vozidla. Jednalo se především o přestavby koňských kočárů. V New Yorku fungoval malý počet elektromobilů jako taxi vozidla. Pro ilustraci této doby lze zmínit například elektromobil značky Baker, který v prvních letech 20. století sestrojila firma Baker Motor Vehicle Company, jež měla sídlo v Ohiu. Elektromotor byl ukrytý pod sedadlem, sada akumulátorů se nacházela v boxu v přední části vozidla a točivý moment na zadní kola přenášel řetěz. Tato první EV se pohybovala rychlostí kolem $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a ujela na jedno nabití přes 25 km. Oproti tehdejším vozidlům se spalovacím motorem poskytovaly mnoho výhod, jaké byly především absence:



Obrázek 3 Baker EV [8]

- vibrací v karoserii
- zápachu
- hluku
- změny převodů (v tehdejších vozidlech zvláště v nezahřátém stavu obtížné)
- startování lidskou silou

Parní automobily skrývaly jiné nevýhody, jakými byly především:

- dlouhé zahřívání (při chladném počasí až 45 min)
- nutnost častého doplňování vody – v důsledku toho tedy potenciálně menší dojezd, než soudobá EV a benzinová vozidla

Lze tedy tvrdit, že EV zaujala na počátku 20. století nemalý počet zákazníků také díky absenci kvalitních mimoměstských vozovek. Svým dojezdem po městě tedy vyhovovala, obsluha se nejevila složitá. Existovaly levné vozy nižší třídy s tehdejší cenou přibližně \$1000, ale i luxusní vozidla. Průměrná cena EV se v této době pohybovala okolo \$3000. Jejich vrcholná produkce v roce 1912 se vedle automobilů se spalovacím agregátem začala snižovat z následujících důvodů.

Ve 20. letech 19. století se začala zdokonalovat síť mimoměstských komunikací. Navíc bylo v americkém Texasu objeveno nové naleziště surové ropy, díky němuž se cena paliva snížila natolik, že na koupi dosahovalo velké procento obyvatel. Charles Kettering vynalezl v roce 1912 elektrický startér. Odstartovala masová produkce továrny Ford, díky níž se podařilo zlevnit základní řady automobilů až na \$500. Naopak méně efektivní výroba EV cenu stále zvyšovala. V polovině 30. let zcela zmizely elektromobily a jejich úkol na dlouhou dobu převzaly běžné automobily.

1.3.2 2. polovina 20. století

V 60. letech ale bylo zapotřebí začít hledat alternativní pohon, svět začal pociťovat znečištění ovzduší a jednotlivé státy nechtěly být závislé na dodávkách ropy.

Právě v těchto letech například firma Battronic ve spolupráci s dalšími podniky zkonstruovala nákladní elektrický vůz. Při maximální rychlosti $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ uvezl více než 1 t nákladu a na jedno nabití absolvoval necelých 100 km. Vedle tohoto EV Battronic ve spolupráci s General Motors vyvinul i další koncepce, jako například užité dodávky nebo dokonce minibusy, které měly kapacitu až 20 cestujících. Následující odstavec se pro ilustraci zaměří na koncepci například Battronic Minivan Electric Delivery Van.

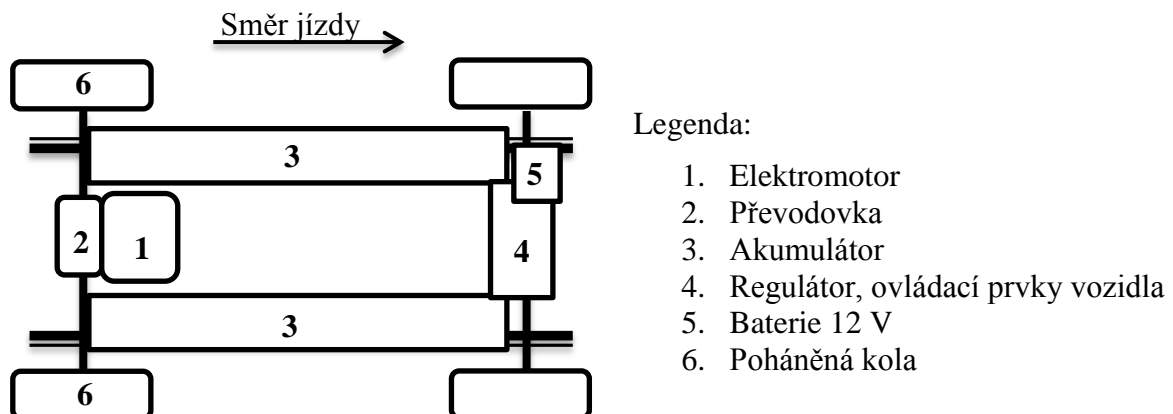
Jednalo se o dvoumístný elektrický minivan. Poháněl jej stejnosměrný sériový motor o výkonu 31 kW, který byl napájen přes regulátor dvěma moduly olověných akumulátorů při napětí 112 V dohromady vážících více než 1000 kg. Tyto akumulátory napájely ještě další 12 V baterii, která dodávala energii do ostatních elektrických zařízení vozidla. Dobíjení akumulátorů probíhalo přes klasickou 230 V síť. Dosahoval značné pohotovostní hmotnosti 2600 kg, užitečné zatížení zaujímal pouze 363 kg. Delivery Van měl dvoustupňovou převodovku s převodovými poměry 1:1 (městský provoz a stoupání, max. $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) a 1:1,96 (mimo město, max. $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Přehradit na jiný stupeň bylo možné pouze za klidu vozidla. Brzdění probíhalo přes hydraulické bubnové brzdy bez rekuperace pohybové energie. Reálný dojezd vozidla v praxi nepřesahoval 100 km. Schéma níže zobrazuje uspořádání základních prvků pohonné soustavy vozidla.



Obrázek 4 Battronic Minivan Electric Delivery Van [10 str. 37]

Dobíjení akumulátorů probíhalo přes klasickou 230 V síť. Dosahoval značné pohotovostní hmotnosti 2600 kg, užitečné zatížení zaujímal pouze 363 kg. Delivery Van měl dvoustupňovou převodovku s převodovými poměry 1:1 (městský provoz a stoupání, max. $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) a 1:1,96 (mimo město, max. $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Přehradit na jiný stupeň bylo možné pouze za klidu vozidla. Brzdění probíhalo přes hydraulické bubnové brzdy bez rekuperace pohybové energie. Reálný dojezd vozidla v praxi nepřesahoval 100 km. Schéma níže zobrazuje uspořádání základních prvků pohonné soustavy vozidla.

V 70. letech 20. století ovládly produkci EV především dva podniky: Elcar Corporation a také Sebring-Vanguard. Oba se zaměřovaly na výrobu malých dvoumístných městských vozítek s dojezdem kolem 50 km. Další významnější událostí v elektromobilismu se jevílo zakoupení 350 kusů elektrických terénních vozidel od Amerian Motor Company americkou poštou. Žádnému z těchto EV se však nedostávalo významnějšího úspěchu, ať už z důvodu stále velmi omezených dojezdů, dlouhého dobíjení, nízkých výkonů nebo také komplikovaného řešení vytápění.



Obrázek 5 Schéma uspořádání pohonné soustavy Battronic Minivan Electric Delivery Van

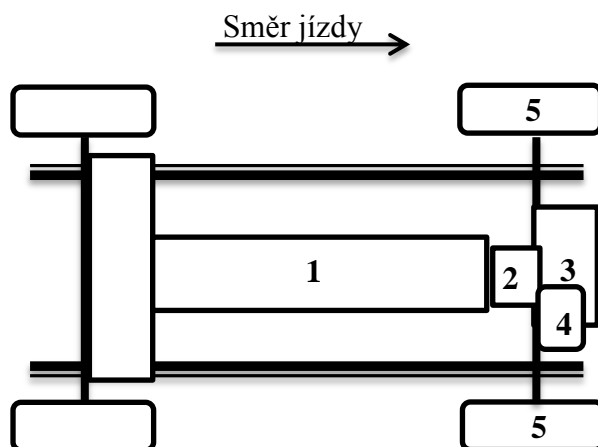
1.3.3 Přelom 20. – 21. století

V 90. letech si svět začal uvědomovat, že je třeba začít jednat ohledně regulací výfukových plynů. Vznikla různá legislativní opatření, která nastartovala novou éru významnějšího vývoje EV. Díky těmto opatřením se pozvolna rozrůstal počet hybridních nebo čistě elektrických vozidel, která vznikla přímým navržením nebo jako přestavba běžného vozidla. Jako příklad elektromobilu přelomu století lze volit legendární elektromobil EV1 od společnosti General Motors ve spolupráci se společnostmi Honda a Toyota, které dnes patří mezi přední výrobce hybridních a elektrických automobilů. Americký projekt Zero Emissions, spuštěný v roce 1990, si kladl za cíl do r. 1998 nahradit 2 % běžných automobilů elektrickými automobily. [13] Právě EV1 se stal pilotním automobilem tohoto projektu.

Jednalo se o dvoumístné sportovní kupé, které počítalo právě s elektrickým pohonem. Zajišťoval jej třířázový asynchronní motor o výkonu 102 kW. Přenos síly na kola zprostředkovávala převodovka se stálým převodem, maximální rychlost omezoval počítač na $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. EV1 1. generace zásobovaly el. energií olověné akumulátory, vozy druhé generace používaly Ni-MH baterie od dceřiné společnosti GM Ovonic a s těmito bateriemi dosahovaly dojezdu až 250 km. Dobíjeny mohly být přes rychlonabíjecí stanice (cca 20 min) nebo přes domácí staniční (2-3 h) nebo přenosné (až 7 h) nabíječky. Bateriová sada obsahovala 26 modulů, olověné po 12 V ($\Sigma 312 \text{ V}$), Ni-MH po 13,2 V ($\Sigma 343,2 \text{ V}$). Stejnoseměrný proud z této sady střídač přeměnil na střídavý a přes regulátor byl veden k asynchronnímu motoru. EV1 se svými parametry dynamiky vyrovnal soudobým sportovně laděným automobilům a disponoval výbavou často převyšující tehdejší konkurenci. Z prvků výbavy lze jmenovat například klimatizaci, elektrohydraulické brzdy, el. kontrolu tlaku v pneumatikách, přední sklo s elektrostatickým nábojem proti usazování nečistot s vyhříváním, dvoustupňové airbasy, xenonové reflektory a další. Celou karoserii tvořily kompozitní materiály, hliníkový rám a ráfky kol, pohotovostní hmotnost vozidla činila 1300 kg, což představovalo hodnotu pozvolna se blížící běžným sportovním automobilům. Velký důraz se kladl také na nízké odpory při jízdě (aerodynamicky příznivá karoserie, pneumatiky Michelin PROXIMA s nízkým valivým odporem). Tato kombina-



Obrázek 6 GM EV1 [12]



Legenda:

1. Akumulátor
2. Řídící jednotka baterií
3. Třířázový motor
4. Regulátor se střídačem
5. Poháněná kola

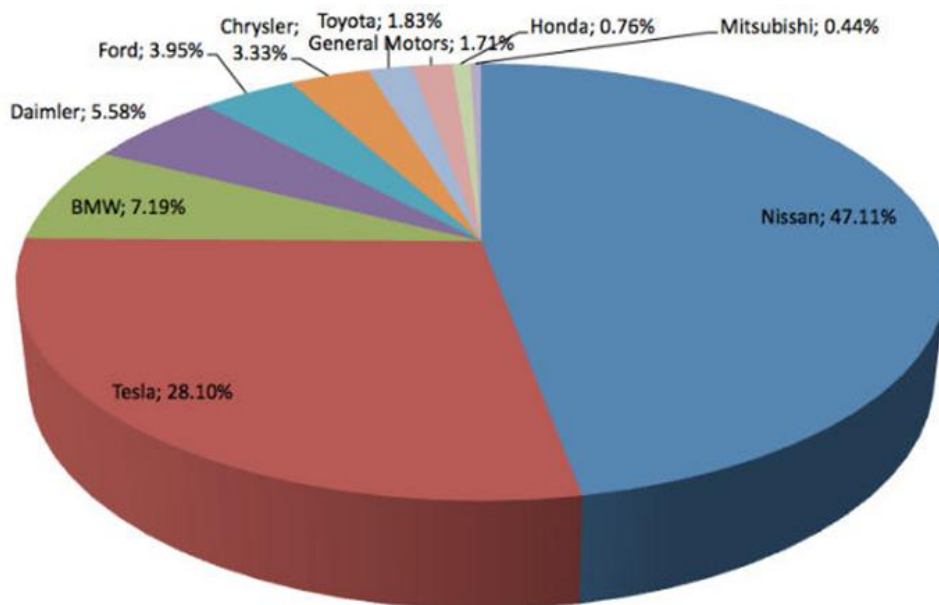
Obrázek 7 Schéma uspořádání pohonných soustav GM EV1

ce ve spolupráci s rekuperací při brzdění motorem zajišťovala vysokou efektivitu celého systému, praktičnost a použitelnost v běžném provozu.

Avšak i přes propracovanost projektu Zero Emissions, především co se týče rozmístění nabíjecích stanic po USA, výhodného leasingu pro majitele kvůli dostupnosti a také vysoké technické vyspělosti systému, celý projekt po výrobě zhruba 1100 kusů skončil. EV1 byla majitelům zabavena, většina sešrotována a některá si ponechala technická muzea. Existuje několik konspiračních teorií o ropných magnátech, kterým se produkce EV nelíbila, avšak doložitelným důvodem přímo od GM byla nákladnost celého projektu, vysoká cena elektromobilů a s tím související velmi nízká poptávka nebo také omezená perspektiva akumulátorů.

1.3.4 Koncepte současných EV

Intenzita současného vývoje automobilů jde ruku v ruce se stále se zpříšňujícími emisními normami, cenou paliva a jeho pozvolna se blížícího nedostatku. Dnes je portfolio koncepcí poněkud rozšířenější, než tomu bylo v minulých letech. Na rozdíl od minulých let dnes existují i EV, která se masově rozšiřují mezi běžné automobily, dlouhodobě se drží na trhu a vykazují vysokou prodejnost. Stále však není jisté, jaké řešení pro pohonnou soustavu je tím nejvhodnějším. Existuje mnoho kombinací jednotlivých částí pohonné soustavy a jejich variant, což bude náplní dalších kapitol. Stávající kapitola dává přehled o základních parametrech a uspořádání pohonných soustav, ať už výběru některých již úspěšných EV současnosti nebo v některých méně rozšířených konceptech.



Obrázek 8 Graf prodejnosti společností prodávajících EV, data pro USA za 06/2014 [14]

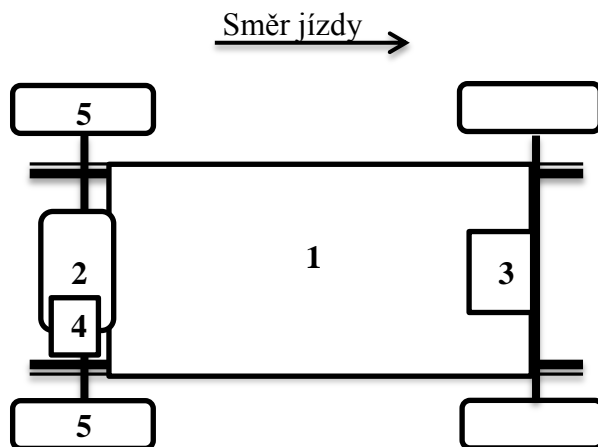
Z hlediska účelu dnes lze najít alternativu elektrického pohonu prakticky kdekoliv. Nejvíce se aplikuje v oblasti osobních, užitkových nebo i sportovních automobilů. Můžeme objevit ale i koncepce EV hromadné dopravy. Častá varianta je přestavba klasického automobilu, setkáváme se ale i se zcela novými konstrukcemi.

Často skloňovaným přímo navrženým EV současnosti bývá Tesla S. Společnost TESLA MOTORS vznikla v roce 2003, kdy se skupina inženýrů v Silicon Valley v USA dohodla na společném vývoji elektromobilů. Prvním projektem z roku 2008 byl sportovní minivůz Tesla Roadster, který vsázel především na jízdní výkony a dojezd, masovějšího rozšíření se však nedočkal. Tesla S vstoupil do prodeje v roce 2012 a svoje početnější zákazníky láká působivými jízdními výkony, luxusní výbavou a osmiletými zárukami. V současné době jsou nabízeny 2 různé modifikace modelu S a vylepšený model se dvěma motory D. Následující tabulka ukazuje přehled základních technických parametrů modelů S a D:

| Charakteristika | Jednotky | TESLA S 60 | TESLA S 85 | TESLA P85D |
|---|-------------------------------------|--|--|--|
| Kapacita baterie | [kWh] | 60 | 85 | 85 |
| Max. dojezd (při $v = 104 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) | [km] | 350 | 460 | 460 |
| Typ motoru | - | 1x 3-fázový asynchronní | 1x 3-fázový asynchronní | 2x 3-fázový asynchronní |
| Výkon motoru | [kW] | 283 | 283 | 386, 165 |
| Zrychlení z 0 na $96.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | [s] | 5.9 | 5.4 | 3.2 |
| Maximální rychlost | [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$] | 193 | 225 | 250 |
| Záruka | - | 8 let nebo 200 000 km na baterii a pohonnou jednotku | 8 let na baterii a pohonnou jednotku (neomezené množství km) | 8 let na baterii a pohonnou jednotku (neomezené množství km) |
| Základní cena (USA, 17. 11. 2014) | [\$] | 71 070 | 81 070 | 105 670 |

Tabulka 1 Technické parametry modelů Tesla S, D

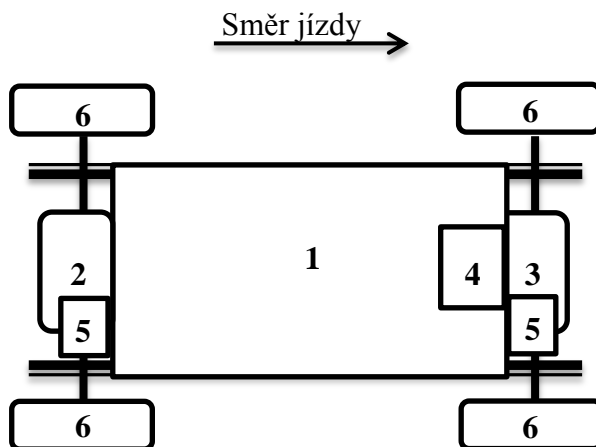
K napájení motoru využívá Tesla Li-ion baterie řízené mikroprocesorem, které jsou uloženy pod podlahou. Stejný proud z baterií měnič s plynule nastavitelnou frekvencí přeměňuje na střídavý, tím zajišťuje regulaci otáček motoru. Navíc umožňuje rekuperační brzdění, což přispívá ke zvýšení dojezdu. Systém navigace ve spolupráci s řídicí jednotkou eliminuje možnost vybití baterií během trasy. Pohotovostní hmotnost modelu S (60 kWh) činí 2108 kg. Relativně vyšší hmotnost kompenzuje hliníková karoserie s ocelovými výztuhami a karoserie s nízkým aerodynamickým odporem. Rozložení hmotnosti díky bateriím rozmístěným v podlaze dosahuje příznivého poměru (přední : zadní kola) 48 : 52 a zároveň se těžiště nachází blízko vozovce. Následující schémata popisují rozložení pohonné soustavy modelů S a D:



Legenda:

1. Akumulátor
2. Elektromotor, převodovka, diferenciál
3. Řídící jednotka akumulátoru
4. Regulátor se střídačem
5. Poháněná kola

Obrázek 9 Schéma uspořádání pohonných soustav EV TESLA model S



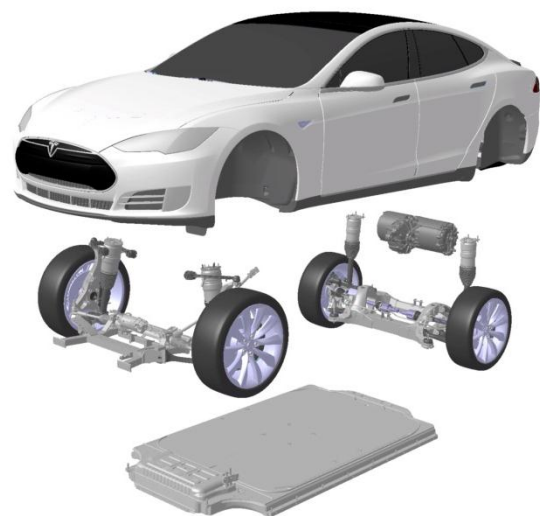
Legenda:

1. Akumulátor
2. Elektromotor, převodovka, dif. (zadní)
3. Elektromotor, převodovka, dif. (přední)
4. Řídící jednotka akumulátoru
5. Regulátor se střídačem
6. Poháněná kola

Obrázek 10 Schéma uspořádání pohonných soustav EV TESLA P85D

Obr. 11 ilustruje předchozí schémata, v jeho spodní části se nachází akumulátorová sada spolu s řídicí jednotkou, celková hmotnost všech 8000 akumulátorových článků, které lze najít v 85 kWh verzích, činí přes 600 kg. Tyto baterie lze dobít různými způsoby:

1. Rekuperačním brzděním (probíhá při každém zpomalování)
2. Pomocí běžné domácí nabíječky (několik hodin)
3. Pomocí tzv. „Superchargerů“, rozmístěvaných po USA, Evropě, Asii – údaje k 24. 11. 2014:
 - a. USA – 132 stanic
 - b. Evropa – 99 stanic (v ČR zatím chybí)



Obrázek 11 Ilustrativní rozstřel jednotlivých částí podvozku EV TESLA model S [15]

c. Asie – 37 stanic

4. Pomocí systému výměny baterií - tento systém výměnných stanic byl představen E. Muskem v roce 2013, zatím však nebyl realizován

Tesla S je jedním z nejúspěšnějších elektromobilů současnosti. Z jednotlivých grafů prodejnosti tohoto vozidla lze vyčíst, že je silným konkurentem až už mezi EV, ale i na trhu s luxusními vozidly se spalovacími motory. Dle LMC Automotive byl v prodejnosti v prvním čtvrtletí roku 2013 mnohem úspěšnější, než Mercedes-Benz S-Class, BMW řady 7 nebo například Audi A8. V současnosti je Tesla jednou z nejdynamičtějších a zároveň nejmladších automobilových společností, rozšiřuje své výrobní kapacity a zaměřuje se nyní na vývoj nového SUV TESLA model X.

Dalším úspěšným vozidlem na elektrický pohon, který zaujal v poslední době nemalé procento zákazníků, je Nissan Leaf. V červnu r. 2014 měl dle diagramu na obr. 8 více než 47% podíl prodejnosti na americkém trhu s elektromobily. Tento menší pětimístný hatchback uvedla na trh společnost Nissan Motor Corporation v roce 2010. Pohání jej střídavý synchronní motor, který je napájen přes měnič stejnosměrného proudu z Li-ion akumulátorů uložených pod podlahou vozidla. Systém navíc umožňuje rekuperační brzdění. Automobil vykazuje mnohem skromnější parametry, než již popisovaný Tesla Model S:

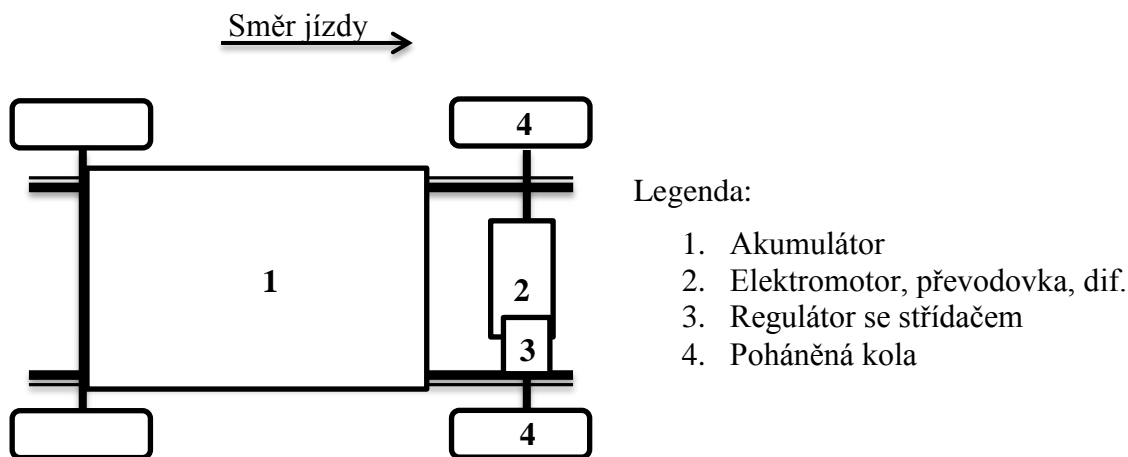


Obrázek 12 Nissan Leaf [18]

| Charakteristika | Jednotky | Hodnota |
|---|----------------------------|---|
| Kapacita baterie | [kWh] | 24 |
| Max. dojezd (město / mimo město) | [km] | 200 / 160 |
| Typ motoru | - | střídavý synchronní |
| Výkon motoru | [kW / min ⁻¹] | 80 / 2730-9800 ot. |
| Točivý moment | [N.m / min ⁻¹] | 280 / 0-2730 ot. |
| Typ baterie / počet článků | - | Li-ion / 192 článků po 1.875 V, $\Sigma 360$ V |
| Zrychlení z 0 na 100 km . h ⁻¹ | [s] | 11.9 |
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 145 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | 1525 |
| Základní cena (ČR 24. 11. 2014) | [Kč] | 715 300 |

Tabulka 2 Vybrané parametry modelu Nissan Leaf

Z hlediska přenosu točivého momentu na kola se oproti modelu Tesla S podstatný základ nemění. V pohonné soustavě mezi elektromotorem a koly lze najít jednostupňovou převodovku s převodovým poměrem 1 : 7.94 a diferenciál. Na rozdíl od Tesly jsou poháněná kola přední:



Obrázek 13 Schéma uspořádání pohonných soustav EV Nissan Leaf

Baterie lze dobíjet několika způsoby dle aktuálních dobíjecích možností:

1. Rekuperačním brzděním (probíhá při každém zpomalování)
2. Pomocí domácí dobíjecí stanice o výkonu 3.3 nebo 6.6 kW, délka nabíjení cca 4 hodiny (pro 6.6 kW)
3. Pomocí rychlonabíjecích stanic, jejichž infrastruktura se neustále zvyšuje, aktuální počet se pohybuje v řádu desítek tisíc po celém světě, z toho v České republice jich lze najít několik desítek. Např. v Plzni je možné Nissan Leaf dobít uvnitř krytého parkoviště u nákupního centra Plzeň Plaza. Dobíjení na 80 % kapacity zabere 30 min.

Systém navigace ve spolupráci s řídicí jednotkou eliminuje možnost vybití baterií během trasy, nabíjecí stanice jsou na mapách vyznačeny. Na Li-ion baterie nabízí Nissan záruku až 5 let nebo 100 000 km, po tuto dobu zaručuje pokles kapacity baterie o max. 25 %. Společnost Nissan navíc nabízí bezplatné vybudování nabíjecích stanic pro firmy a podporu zajištění infrastruktury stanic pro běžné zákazníky prakticky kdekoliv v návaznosti na počet majitelů v dané lokalitě. Za svoji dosavadní éru získal Leaf mnoho ocenění, v roce 2011 se stal světovým automobilem roku.

Další současná koncepce elektrovozidla pochází od bavorské automobilky BMW. Jedná se konkrétně především o typ BMW i3, jehož prodej byl zahájen na konci roku 2013. Od té doby se k prosinci r. 2014 prodalo více než 10 000 kusů. Tento menší především městský čtyřmístný automobil pohání střídavý synchronní elektromotor přes jednostupňovou převodovku, který je uložen v jeho zadní části.

Následující tabulka ukazuje přehled vybraných parametrů i3:



Obrázek 14 BMW i3 [22]

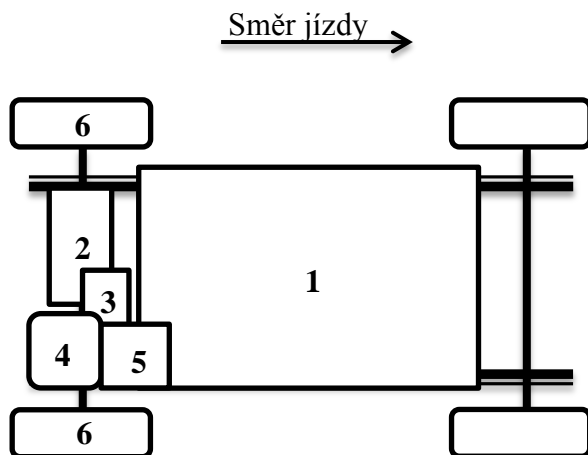
| Charakteristika | Jednotky | Hodnota |
|--|---------------------------------|---------------------------|
| Kapacita baterie | [kWh] | 22 (18.8 využitelných) |
| Max. dojezd (kombinovaný) | [km] | 130-160 |
| Typ motoru | - | střídavý synchronní |
| Výkon motoru | [kW] | 125 |
| Točivý moment | [N . m / min ⁻¹] | 250 / 0-4800 |
| Typ baterie | - | Li-ion |
| Zrychlení z 0 na 100 km . h ⁻¹ | [s] | 7.2 |
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 150 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | 1195 |
| Základní cena běžné verze (ČR 29. 11. 2014) | [Kč] | 936 000 |

Tabulka 3 Přehled vybraných parametrů BMW i3

K zajímavostem tohoto automobilu patří především možnosti dobíjení baterií:

1. Rekuperativní brzdění
2. Domácí nabíjení se zabudovanou nabíječkou Wallbox 7.4 kW, která dobije 80 % akumulátoru během 3 hodin.
3. Dobíjení přes veřejné rychlonabíjecí stanice ChargeNow, jejichž síť je neustále rozšiřována včetně území České republiky.
4. Verze BMW i3 REX je navíc vybavena dvouválcovým benzinovým motorem o objemu 650 ccm, který se spustí, pokud kapacita akumulátoru klesne pod 6.5 %, takto se zvýší potenciální dojezd na více než 300 km.

Karoserie uložená na hliníkovém modulu podvozku se skládá z uhlíkových kompozitů. Termoplasty, jakožto materiály vnějších částí karoserie, se vyznačují nižší hmotností než konvenční plech a navíc jsou poddajné, což je ve městě při drobných kolizích výhodou. Kromě zmiňovaných prvků snižování hmotnosti je snahou u BMW i3 dosáhnout co nejnižších jízdních odporů úzkým profilem pneumatik (155 mm) a jejich speciálním dezénem.



Legenda:

1. Akumulátor
2. Elektromotor, převodovka, dif.
3. Regulátor se střídačem
4. Spalovací motor (REX)
5. Palivová nádrž (REX)
6. Poháněná kola

Obrázek 15 Schéma uspořádání pohonné soustavy BMW i3 REX

Další ze současných úspěšných EV pocházejí taktéž z Německa, konkrétně koncern VW vyrábí několik vozidel, která využívají pro svůj pohon pouze elektrickou energii.

V roce 2013 se na autosalonu ve Frankfurtu představil model VW e-Up!. Podobně jako u BMW i3 se jedná o malý čtyřmístný automobil vhodný především do městského provozu. V Česku jej aktuálně (30. 11. 2014) lze pořídit za základních 605 900 Kč. Platforma je shodná s benzinovou verzí Up nebo automobilem Škoda Citigo. Pohání jej však střídavý synchronní elektromotor o výkonu 60 kW a točivém momentu 205 N . m skrze jednostupňovou převodovku. Motor odebírá přes měnič el. proud z Li-ion



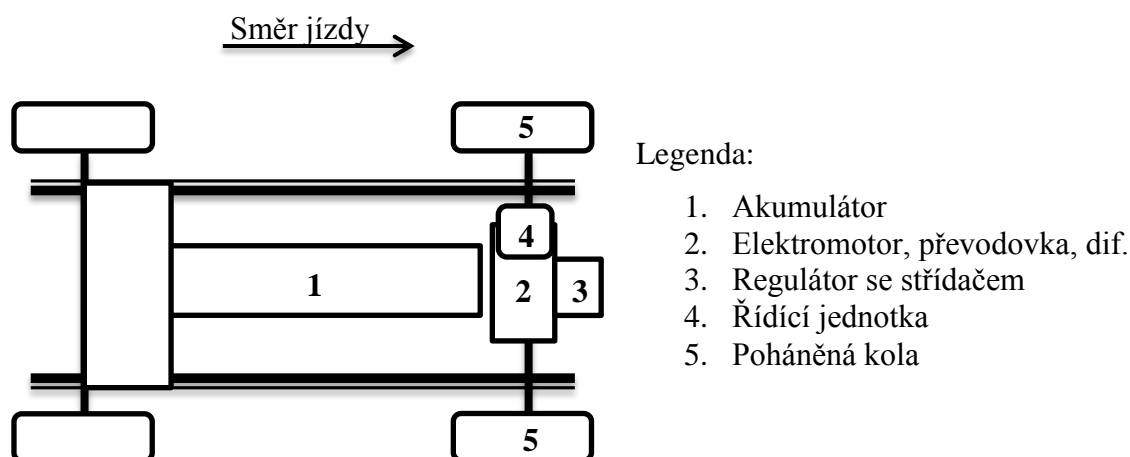
Obrázek 16 VW e-Up! [27]

akumulátorů uložených pod podlahou o celkové kapacitě 18.7 kWh zajišťujících dojezd 150 km. Maximální rychlost je elektronicky omezena na 130 km . h⁻¹ a zrychlení z 0 na 100 km . h⁻¹ proběhne za 12,4 s. Samozřejmostí je rekuperace brzděné energie. Pohotovostní hmotnost vozidla činí 1204 kg. Schéma uspořádání pohonné soustavy e-Up! bude totožná se schématem dále charakterizovaného VW e-Golf. Větší e-Golf, založený na platformě klasického VW Golf, vstoupil do prodeje na počátku roku 2014. Tento pětimístný hatchback používá taktéž synchronní střídavý elektromotor, avšak o vyšším výkonu 85 kW a točivém momentu 270 N . m. V České republice jej aktuálně (14. 12. 2014) lze pořídit za základních 909 900 Kč. Typově je pohonné ústrojí zcela shodné s modelem e-Up!, Li-ion akumulátory, dodávající proud, dosahují kapacity 24 kWh, což zajišťuje dojezd méně než 140 km. Maximální rychlost je omezena na 140 km . h⁻¹, z 0 na 100 km . h⁻¹ lze zrychlit za 10.4 s. Pohotovostní hmotnost je 1538 kg.



Obrázek 17 VW e-Golf [31]

Uspořádání pohonné soustavy je patrné z následujícího schématu:



Obrázek 18 Schéma uspořádání pohonné soustavy VW e-Golf

Přestože je všeobecně VW, konkrétně modelová řada Golf, v segmentu osobních automobilů velmi populární, elektrická verze je prozatím v pozadí. Důvodem může být například vyšší cena a také omezenější dojezd nebo nedůvěra zákazníků v inovativní řešení pohonu.

Pohon elektrickou energií se zavádí i do oblasti sportu a volnočasových aktivit, jak ilustruje zástupce SRI EV1 Buggy. Zde nalézá uplatnění především vysoký točivý moment produkovaný dvojicí elektromotorů. Nezisková organizace SRI, která tento pouštní závodní vůz vyvi-



Obrázek 19 SRI EV1 Buggy [32]



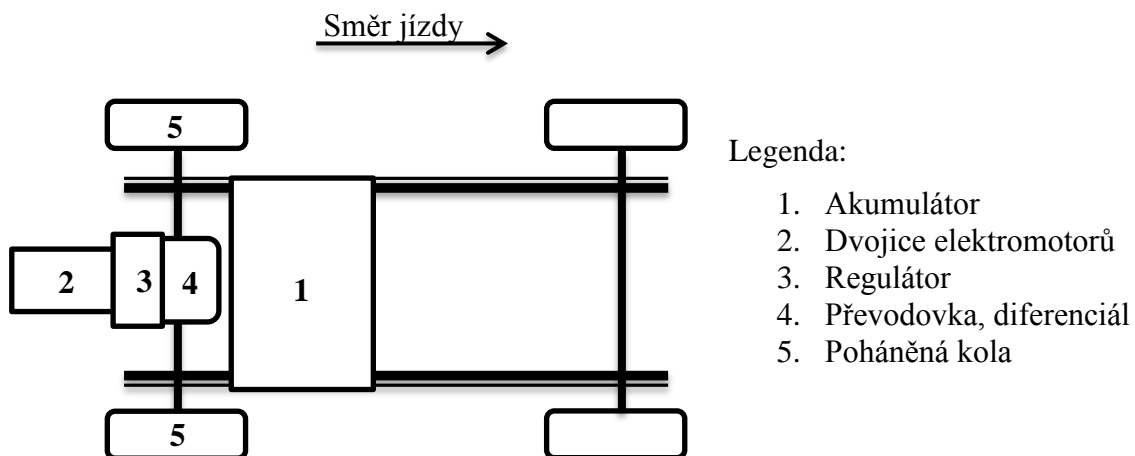
Obrázek 20 SRI EV1 Buggy - pohonné ústrojí [32]

nula, jej osadila pohonným ústrojím od společnosti EV West. Dva stejnosměrné elektromotory uložené v zadní části vozu zásobují energií přes regulátor Li-ion baterie. Tyto motory, uložené v rámu nad sebou, jsou navzájem propojeny ozubeným karbonovým řemenem a jejich společný točivý moment dále putuje ke čtyřstupňové sekvenční převodovce. Na následující straně je přehled technických údajů SRI EV1 Buggy.

| Charakteristika | Jednotky | Hodnota |
|---|-------------------------|--------------------------------|
| Typ motoru | - | (2x) stejnosměrný elektromotor |
| Výkon motoru | [kW] | (2x) 200 |
| Kapacita baterie | [kWh] | 82 |
| Max. dojezd (v závislosti na provozních podmínkách) | [km] | 100 |
| Točivý moment | [N . m] | 1016 |
| Typ baterie | - | Li-ion |
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 200 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | 2381 |

Tabulka 4 Technické údaje SRI EV1 Buggy

Nabíjení je řešeno přes 240 V nabíječku, po 5 hodinách je akumulátor opět dobítý. V případě pouštních podmínek SRI zkonstruovala speciální dobíjecí přívěs s generátorem, který tento úkon zvládne za stejný čas. Poháněná kola jsou pouze zadní, jak vyplývá z následujícího schématu pohonné soustavy:



Obrázek 21 Schéma uspořádání pohonné soustavy SRI EV1 Buggy

1.4 Elektromotory a jejich využitelnost v EV

1.4.1 Přehled druhů elektromotorů

Elektromotory jsou stroje, které slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Nejčastěji se jedná o točivý moment M , který je vytvářen na rotoru elektromotoru. Existují však i lineární elektromotory, které nevytváří točivý moment, ale pouze posuvovou sílu F . Těmito netočivými motory se ale ve smyslu hlavní pohonné jednotky kol elektromobilu není třeba zabývat.

Základními konstrukčními prvky točivých elektromotorů jsou rotor (otáčí se) a stator (je statický). Motory lze rozdělit dle následujícího schématu:

| | | | | | |
|--|--------------------|---|--------------------------------------|---------|------------|
| Střídavé (AC) -elektromotor je napájen střídavým proudem | | Stejnoseměrné (DC) -elektromotor je napájen stejnosměrným proudem | | | |
| Synchronní | Asynchronní | | Kartáčové DC motory | | |
| | S vinutým rotorem | S klecovou kotvou | Bezkartáčové DC motory (BLDC) | | |
| | | S cizím buzením | Derivační | Sériové | Kompaundní |

Tabulka 5 Rozdělení točivých elektromotorů

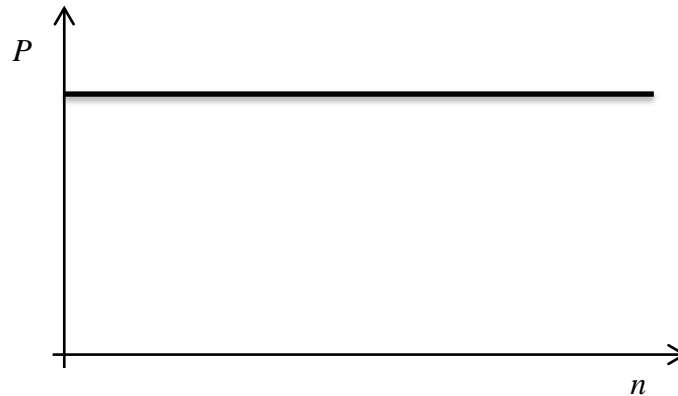
Z hlediska uložení motoru ve vozidle pak lze dělit motory takto:

1. *Elektromotory uložené v rámu vozidla* – Přenos síly z elektromotoru na kola zajištěn soustavou hřídelí (případně přes převodovku, diferenciál).
2. *Elektromotory uložené v kole vozidla (HUB motor)* – Rotor i stator se nachází v náboji kola, přičemž rotor elektromotoru je spojen s rotační částí kola, výhodné z hlediska technické nenáročnosti, zvětšení prostoru v karoserii vozidla, nevýhodné z hlediska jízdních vlastností – větší neodpružená hmotnost v porovnání s klasickým kolem, což má za následek zvětšení amplitudy kmitů, hůře proveditelné je pak jejich tlumení.

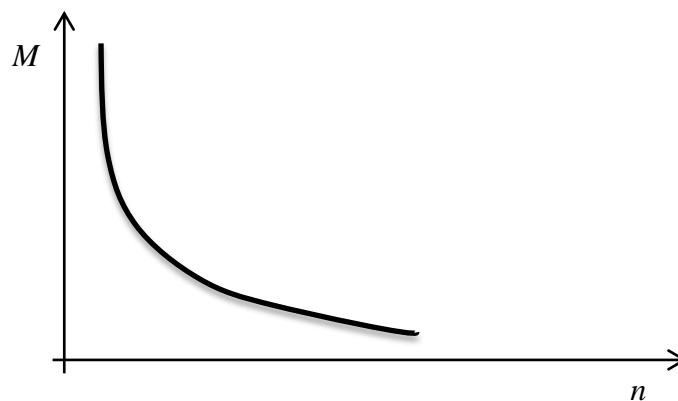
1.4.2 Specifikace požadavků na pohonnou jednotku vozidla

Před tím, než bude pojednáno o konkrétních elektromotorech, je užitečné specifikovat požadavky na ně kladené pro pohon vozidla a s těmito požadavky vlastnosti jednotlivých elektromotorů porovnat. Následující výpis postihuje základní a nejdůležitější požadované vlastnosti pohonné jednotky vozidla:

- Dostatečný maximální výkon a točivý moment pro pohon, průběh obou veličin blízky ideální charakteristice pohonné jednotky, která je dána požadavkem konstantního výkonu P_{MAX} při libovolných otáčkách n . Výkon P_{MAX} je funkcí točivého momentu M a otáček n . Tuto závislost lze vyjádřit vzorcem $P_{MAX} = \frac{M_{MAX} \cdot n}{2\pi}$. V návaznosti na tuto závislost vypadají křivky $P_{MAX}(n)$ a $M_{MAX}(n)$ takto:



Obrázek 22 Ideální charakteristika pohonu $P(n)$



Obrázek 23 Ideální charakteristika pohonu $M(n)$

- Umožnění regulace velikosti točivého momentu a otáček jednoduchým a účinným způsobem, výhodou je rekuperace energie při brzdění. Vzhledem k tomu, že provoz silničního vozidla vykazuje neustálé změny v rychlosti i zatížení, musí být pohonná jednotka schopna rychlé reakce na danou situaci.
- Nízká energetická náročnost, s tím související především vysoká účinnost přeměny jakéhokoliv druhu energie na energii mechanickou.
- Nízká hmotnost, aby zatížení na jednotlivé prvky podvozku bylo co nejnižší. S tím souvisí také jízdní vlastnosti, pro které je právě hmotnost a její rozložení jedním z určujících faktorů. Také opotřebení podvozku při provozu a s tím související dimenzování a ekonomická náročnost konstrukce podléhá danému zatížení.
- Nízká hlučnost, co nejmírnější dopad na životní prostředí.
- Možnost akumulace energie pro zásobování této pohonné jednotky kvůli zajištění vysokého dojezdu bez doplnění energie z vnějších zdrojů.
- Dostatečně malé zástavbové rozměry, které umožní pohonnou jednotku instalovat do rozměrově schváleného vozidla dle platné legislativy.

- Technická jednoduchost provedení, co možná nejmenší počet dílů. S tím souvisí také snadná vyrobiteľnosť jednotlivých dílů, jejich smontovatelnost a demontovatelnost a snadná výměna, která je důležitá z hlediska případných oprav.
- Vysoká spolehlivost pohonné jednotky, snadná a ekonomicky nenáročná údržba.

1.4.3 Střídavé elektromotory (AC)

Střídavé elektromotory jsou tedy elektrické stroje, které napájí při provozu střídavý proud. Pokud je zdrojem akumulátor, který poskytuje stejnosměrný proud, je nutné mezi akumulátor a elektromotor vložit kromě regulátoru ještě střídač, který zajistí požadovanou konverzi. Tyto elektromotory jsou založeny na principu točivého magnetického pole, které vzniká při průchodu třífázového napájení kruhovým vinutím elektromotoru. Točivé magnetické pole poté vyvolává točivý moment na hřídeli, který je přenesen na kola vozidla. Existují dva základní typy střídavých motorů:

1. *Synchronní střídavý elektromotor* – Otáčí se synchronně s otáčkami točivého magnetického pole. Stator elektromotoru tvoří elektrotechnické plechy, které jsou uspořádány do tvaru dutého válce. Vnitřním obvodem prochází drážky, kde je uloženo třífázové vinutí. Rotor tvoří permanentní magnet nebo elektromagnet, který je připevněn na hřídel elektromotoru. Připojí-li se elektromotor ke zdroji, vytvoří se ve statoru točivé magnetické pole. Póly rotoru jsou přitahovány protipóly statoru a naopak odpuzovány póly souhlasnými. To však pro rozběh elektromotoru nestačí, je potřeba vnější síla F , která uvede rotor do otáčivého pohybu. Ten je pak vtažen do synchronních otáček. Takováto síla F je v praxi realizována určitým druhem rozběhového systému. Řízení je pomocí frekvenčního měniče, který reaguje na aktuální polohu rotoru.
2. *Asynchronní střídavý elektromotor* – Otáčí se asynchronně s otáčkami točivého magnetického pole. Konstrukce statoru je obdobná jako u synchronního motoru. Rotor může mít dvojí provedení: klecová kotva (nejčastější případ) nebo vinutý rotor. V prvním případě je tvořen svazkem elektrotechnických plechů připevněných na hřídel elektromotoru. Po obvodu jsou drážky, kde jsou uloženy navzájem spojené vodiče. Ve druhém případě má rotor třífázové vinutí, jehož konce fází jsou připojeny ke sběrným kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče – kluzný kontakt. Připojí-li se elektromotor ke zdroji napětí, vytvoří se ve statoru točivé magnetické pole, které ve vodičích rotoru indukují napětí. Rotorem pak začne procházet střídavý el. proud, který vyvolá vznik magnetického pole, jehož účinky vytvoří točivý moment M na hřídeli. Otáčky statoru indukují napětí v rotoru, tedy rotor se otáčí vždy pomaleji o tzv. skluz s , než točivé magnetické pole statoru. Lze jej jednoduše regulovat změnou frekvence f napájecího napětí.



Obrázek 24 Stator asynchronního elektromotoru [36]



Obrázek 25 Rotor asynchronního elektromotoru - klecová kotva [36]



Obrázek 26 Asynchronní elektromotor [36]

1.4.4 Stejnoseměrné elektromotory (DC)

DC motory jsou elektrické stroje, které jsou napájeny stejnosměrným proudem. Základními konstrukčními prvky jsou opět rotor a stator. Stator je tvořen permanentním magnetem nebo elektromagnetem. Elektromagnet se skládá z elektrotechnických plechů, které jsou naskládány na sebe ve tvaru dutého válce, a vinutím napájeným stejnosměrným elektrickým proudem. Rotor tvoří elektrotechnické plechy s drážkami, v nichž se nachází vinutí. Začátky a konce vinutí jsou připojeny ke komutátoru, na jehož lamely dosedají kartáče, které přivádí proud do vinutí rotoru. Některé současné elektromotory nevyužívají pro komutaci kartáče, ale jsou komutovány elektronicky pomocí tzv. Hallových sond, snímajících polohu rotoru – BLDC motory. Když je elektromotor připojen ke zdroji, vytvoří se v rotoru magnetické pole, silové účinky magnetických polí rotoru a statoru vyvolají točivý moment M . Při otáčení je třeba měnit směr průtoku elektrického proudu v rotoru – zajišťuje komutátor. Stejnoseměrné elektromotory můžeme rozdělit dle způsobu zapojení vinutí buzení a rotoru dále na:

1. *Elektromotory s cizím buzením* – Varianta derivačního motoru, napájení buzení a kotvy je však vzájemně odděleno. Otáčky lze řídit jak změnou napájecího napětí na kotvě, tak i změnou napájecího napětí na buzení. Využívají se zřídka.
2. *Sériové elektromotory* – Budící vinutí a vinutí kotvy je zapojené do série. Řízení otáček probíhá změnou napájecího napětí, ze své podstaty musí být stále zatížený. Ve velké míře se používají pro pohon ručního nářadí a kuchyňských strojů.
3. *Derivační elektromotory* – Vinutí statoru a rotoru jsou zapojena paralelně. Řízení otáček změnou napájecího napětí je problematické, z tohoto důvodu se derivační motory využívají jen zřídka.
4. *Kompaundní elektromotory* – Má sériové i paralelní buzení, jejichž magnetické toky působí souhlasně nebo proti sobě, tímto je dána charakteristika motoru. Regulace probíhá změnou napětí, využití nachází např. u pohonu výtahů, pracovních strojů, městské hromadné dopravy.

1.4.5 Elektromotory užívané pro pohon vozidel, konkrétní aplikace

Pro pohon v dřívějších vozidlech byly převážně využívány stejnosměrné motory sériové, jako příklad lze uvést například zmiňovaný Battionic Minivan Electric Delivery Van. Toto řešení skýtalo mnoho nevýhod, jakými byly například: nutnost údržby komutátoru a kartáčů, omezená životnost, nižší efektivita. Tyto motory začaly být nahrazovány třífázovými asynchronními, jako například u GM EV1, ale i u současných elektromobilů TESLA. Odpadá tím nutnost údržby, protože nepotřebují pro svůj provoz komutátor. Další častou variantou moderních EV začíná být využití synchronního střídavého motoru – např. Nissan Leaf, BMW i3, VW e-Golf, e-Up!

1.5 Akumulátory pro elektrická vozidla

1.5.1 Základní charakteristika akumulátoru

Akumulátor lze definovat jako zařízení, které přeměňuje chemickou energii na energii elektrickou. Tato změna je vratná, což představuje rozdíl oproti bateriím, kde tato transformace probíhá pouze jednosměrně – nelze je tedy po vyčerpání energie znovu dobít. Akumulátor tedy shromažďuje energii získanou nabitím pomocí stálého zdroje elektrické energie, je schopen ji ve formě energie chemické uchovat a v případě potřeby poté opět přeměnit na elektrickou energii. Tato zařízení najdeme v běžných spotřebičích jako například mobilní telefon, notebook, ale i v každém automobilu – vedle napájení elektrozařízení v autě především kvůli možnosti nastartování automobilu. Avšak největší nároky na akumulátory jsou nejčastěji

u takových strojů, kde je jejich energie použita pro jejich primární funkci. Důležitými parametry akumulátorů určených pro EV jsou především:

- kapacita, [kWh]
- specifická hustota energie, [kWh / kg]
- účinnost, [%]
- samovybití, ztráty
- počet cyklů n , [-]

1.5.2 Druhy akumulátorů pro EV

Následující charakteristika postihuje nejrozšířenější druhy akumulátorů, které nachází uplatnění právě v EV.

1. *Olověné (kyselinové) akumulátory* – Nejčastějším základem těchto akumulátorů je elektrolyt na bázi kyseliny sírové, do něhož jsou ponořeny olověné elektrody. Z hlediska využití v elektromobilech se jedná o nejstarší, velmi častý typ akumulátoru. Až v 90. letech jej (v EV) začaly nahrazovat modernější typy. Nevýhodami jsou především nízká specifická hustota energie, jedovaté olovo je těžké a poměrně drahé. Elektrolyt může být ve formě kapaliny – nutná častější údržba (doplňování elektrolytu) nebo gelu – téměř bezúdržbové.
2. *Alkalické (zásadité) akumulátory* – Tyto akumulátory se konstrukčně v zásadě neliší od kyselinových, pouze složení elektrolytu a elektrod je jiné. V oblasti pohonu EV dnes prakticky nahradily olověné akumulátory. Elektrolyt je zásaditý, podle aktivního materiálu elektrod lze dále dělit na akumulátory:
 - a. Ni-MH – např. GM EV1
 - b. Ni-Cd
 - c. Ni-Fe
 - d. Li-ion – v současné době nejrozšířenější (Tesla, VW, Nissan Leaf atd.), dobrá specifická hustota energie – lithium je velmi lehký kov
 - e. Li-Pol
 - f. Li-Mn
 - g. Ag-Zn, Li-Fe-Y-Po4 atd.

Použití konkrétních druhů akumulátorů závisí tedy nejen na provozních a výkonnostních parametrech, ale také na dostupnosti základních surovin a s tím související ekonomičnosti výroby.

1.5.3 Způsoby dobíjení akumulátorů

Akumulátory v elektricky poháněných vozidlech lze dobíjet různými způsoby:

1. *Rekuperativním brzděním* – Elektromotor se za jízdy při brzdění přepne do generátorského režimu, pomocí něhož dodává energii zpět při určitém druhu regulace do akumulátoru. Díky této technologii lze prodloužit dojezd elektromobilu.
2. *Pomocí palubní nabíječky* – Bývá standardní výbavou elektromobilu, lze ji připojit k běžné elektrické síti 230 V, rychlost nabíjení je díky jejímu omezenému výkonu nízká (zpravidla více než 3 h).
3. *Pomocí nabíjecích stanic* – Tento způsob nabíjení je závislý na vybudované infrastruktuře dobíjecích stanic. Podobně jako při tankování pohonných hmot na čerpacích stanicích se zde elektromobil za poplatek dobíjí. Rychlost dobíjení je mnohem vyšší, než je tomu v předchozím případě, a závisí na konkrétní aplikaci.

4. *Pomocí systému výměny akumulátoru* – U tohoto způsobu se nejedná o dobíjení, ale o přímou výměnu celého akumulátoru na stanici k tomu určené. Akumulátor musí být v tomto případě snadno přístupný, jednoduše a v krátkém čase vyměnitelný, musí být zajištěna dostatečná infrastruktura stanic pro výměnu. Vybitý akumulátor je na stanici postupně dobit a poté putuje do dalšího vozidla, které přijelo na výměnu. Tato varianta je velmi výhodná z hlediska rychlosti a operativnosti „doplnění“ elektrické energie, ale vybudování potřebných stanic a celkového systému je velmi nákladné, vhodné pro realizaci by mohlo být například seskupení více výrobců elektromobilů, kteří by se vzájemně dohodli na normalizaci akumulátorů a tedy i sjednocení stanic. Doposud se touto myšlenkou zabývá především společnost TESLA.

1.6 Uspořádání pohonných systémů již navržených elektromobilů

Navržené koncepce elektromobilů lze členit podle několika hledisek, výběr jednotlivých variant podléhá především předpokládaným provozním podmínkám. Jednotlivé články pohonné soustavy vycházejí z obr. 1 a jsou jimi tedy:

- sada akumulátorů
- řídicí jednotka elektromotoru (regulátor, případně i střídač)
- elektromotor
- spojka
- převodovka
- diferenciál
- poháněná kola

Vzájemné umístění těchto článků bude rozebráno v následujících podkapitolách.

1.6.1 Umístění akumulátoru

Z důvodu vysoké hmotnosti a tedy znatelného ovlivnění souřadnic těžiště elektromobilu v rovině kolmé na směr jízdy $T [T_x, T_y]$ se akumulátor vertikálně, v ose y , umísťuje v karoserii co nejblíže vozovce. Horizontální (příčná) poloha těžiště akumulátoru, v ose x , se volí většinou taková, aby odpovídala požadované horizontální poloze těžiště elektromobilu, tedy většinou uprostřed. Volba podélného umístění akumulátoru v elektromobilu závisí na konkrétních požadavcích na jízdní vlastnosti, které určuje poměr hmotností přední / zadní náprava. Dále závisí na volbě poháněných kol, tedy z hlediska adheze je potřeba na tyto kola vyvíjet zatížení. V neposlední řadě závisí také na využitelném zástavbovém prostoru. Z těchto úvah vyplývá, že má podstatný smysl se zabývat především podélným umístěním akumulátoru, které skýtá tyto možnosti:

1. *Akumulátor v zadní části vozidla, jednodílný* – např. SRI EV1 Buggy (obr. 21)
2. *Akumulátor v zadní a střední části vozidla, jednodílný* – různé tvary souměrné podle podélné osy vozidla, nejčastější případ v současnosti, např. VW e-Golf (obr. 17), e-Up! (obr. 16), BMW i3 (obr. 15), Nissan Leaf (obr. 13), všechny současné modelové řady automobilové společnosti TESLA (obr. 9, 10) atd.
3. *Akumulátor ve střední části vozidla, dělený* – Skládá se ze dvou a více navzájem propojených částí, jejichž společné těžiště leží na středu, např. Battronic Minivan Electric Delivery Van (obr. 4).

1.6.2 Umístění řídicí jednotky, případně střídače

Určující veličinou pro umístění tohoto článku pohonné soustavy není hmotnost. Faktory pro umístění řídicí jednotky jsou především zástavbové prostory, co nejmenší délka kabelo-

vého vedení. Z tohoto důvodu se řídicí jednotka umísťuje v současných elektromobilech především v blízkosti elektromotoru.

1.6.3 Umístění elektromotoru

Pro volbu umístění hnacího elementu je důležitá především projektovaná kinematická cesta mezi elektromotorem a hnaným kolem a také volba poháněných kol. Malou měrou má vliv na umístění elektromotoru jeho hmotnost a s tím související adhezní podmínky, i zde platí preference umístění blízko vozovce a příčně takovým způsobem, aby soustava elektromotor – diferenciál – převodovka měla společné těžiště nejbližší středu.

1. Pokud se nachází mezi elektromotorem a hnaným kolem převodovka nebo diferenciál, je nevhodnější jej z hlediska efektivnosti přenosu točivého momentu M_t umístit co nejbližší těmto článkům. Čím delší, složitější a rozměrnější je dráha přenosu M_t , tím větší ztráty vznikají v ložiscích a různých typech převodovek a kloubů. Záleží tedy především na volbě poháněných kol:
 - a. *Přední* – Z hlediska adheze a délky kinematické cesty je vhodné situovat elektromotor v přední části vozidla, ideálně mezi předními koly, např. VW e-Up!, VW e-Golf, Nissan Leaf.
 - b. *Zadní* – Z analogických důvodů k předchozí variantě je vhodné situovat elektromotor v tomto případě v zadní části, nejlépe mezi zadními koly, např. SRI EV1 Buggy, BMW i3, TESLA model S.
 - c. *Přední + zadní* – Zde se naskýtá několik variant umístění pohonné jednotky:
 - i. *Vpředu* – Mezi předními koly se nachází elektromotor, jehož točivý moment M_t je rozdělen mezi přední a zadní nápravu v požadovaném poměru.
 - ii. *Vzadu* – Jedná se o analogii předchozí varianty, elektromotor se nachází mezi zadními koly
 - iii. *Vpředu i vzadu* – Mezi jednotlivými dvojicemi kol se nachází elektromotor, každou nápravu tedy pohání vlastní pohonná jednotka, odpadá tak problém s dlouhou kinematickou cestou mezi jednotlivými nápravami, rozdělení točivého momentu mezi přední a zadní nápravou je automaticky prováděno řídicí jednotkou. Výhodou může být i vyšší výkon produkovaný dvojicí elektromotorů. Toto řešení je však nákladnější a z energetického hlediska náročnější, např. TESLA P85D.
2. Pokud je elektromobil projektován s elektromotory v kolech, není třeba přenosového systému, jeho umístění je v návaznosti na volbě poháněných kol zcela zřejmé.

1.6.4 Umístění převodovky, diferenciálu

Umístění těchto prvků neskýtá příliš možností, je spjato s volbou umístění elektromotoru a volbou poháněných kol. Přenosový systém slouží tedy k přenosu točivého momentu M_t z výstupního hřídele elektromotoru na poháněná kola, fyzicky tedy tvoří vždy mezičlánek mezi těmito dvěma částmi pohonné soustavy nebo (v případě elektromotorů v kolech) není přítomný vůbec.

1.6.5 Poháněná kola

Volba poháněných kol závisí především na požadovaných jízdních vlastnostech elektromobilu. Jak vyplývá z kapitoly 2.6.3, existují tři varianty (pokud jsou uvažovány dvě nápravy):

1. *Pohon předních kol* – Výhodný je především pro své příznivější jízdní vlastnosti pro začátečníky. Pokud dojde při zatáčení ke ztrátě adheze, stává se vozidlo v různé

míře dle rozložení hmotnosti buď nedotáčivým nebo přetáčivým. Nedotáčivost je vlastnost vozidla, která má při smyku za následek skluz nejdříve přední části vozidla, bez jeho relativní rotace. Přetáčivost má při smyku za následek nejprve skluz zadní části vozidla (tím je udělena jeho relativní rotace). V případě předního pohonu lze nedotáčivý smyk řešit mírným odlehčením plynového pedálu. V případě přetáčivého smyku je třeba pootočit přední kola na opačnou stranu a mírně zatížit plynový pedál. Nevýhodou předního pohonu je nižší schopnost adheze, protože při akceleraci nebo jízdě do kopce jsou přední kola odlehčena, a také nákladnější provedení nápravy, která je zatížena točivým momentem M_t a je současně říditelná.

2. *Pohon zadních kol* – Tato varianta je ekonomicky výhodnější a je schopna vyšší adheze, než je tomu u pohonu předních kol. Nevýhodou však zůstává obtížnější manévrovatelnost v případě smyku, kdy je třeba zručnější manipulace s ovládacími prvky včetně brzd.
3. *Pohon všech kol* – Tato varianta je ekonomicky nejméně výhodná, zaručuje však velmi dobré jízdní vlastnosti a je schopna ze všech variant nejlepší adheze. V případě jednoho elektromotoru (vpředu nebo vzadu) je pomocí soustavy hřídelů a určitého typu mezinápravového diferenciálu zajištěno rozdělení točivého momentu M_t mezi všemi koly. Pokud je elektromobil vybaven více elektromotory (vpředu i vzadu), nutnost mezinápravového přenosu odpadá, optimální rozložení točivých momentů M_t na jednotlivá kola je řízeno elektronicky.

2 Konceptní řešení uspořádání pohonných soustav elektromobilu

V této části bakalářské práce budou navrženy tři typy elektromobilů odlišující se různými aspekty – především plánovaným využitím, velikostí i finanční nákladností. Jejich požadované vlastnosti budou specifikovány včetně požadavků na pohonnou soustavu každého z nich, dle této specifikace a s pomocí výpočtů budou následně navrženy konkrétní části jednotlivých pohonných systémů včetně jejich uspořádání v karoserii a jejich technických parametrů. Se-stavené varianty budou na závěr práce zhodnoceny a porovnány.

2.1 Koncepce č. 1 - malý městský elektromobil

2.1.1 Charakteristika

Toto vozidlo bude sloužit především k přesunu na kratší vzdálenosti. Převážně bude využíváno k pohybu po městě, kde nabídne jednoduchou manipulaci vzhledem ke své nízké hmotnosti, nebude však z hlediska maximální rychlosti vyloučeno cestování po komunikacích mimo město. Malé rozměry, především délka, zajistí bezproblémové zaparkování. Elektromobil uveze bez komplikací čtyři osoby, v zavazadlovém prostoru zbyde rovněž dostatek prostoru využitelný například pro nákup nebo přepravu malých zavazadel. Bude se jednat o vůz pro méně náročné zákazníky, cenově dostupný pro většinu obyvatel. Výbava elektromobilu nabídne pouze základní prvky s ohledem na nízkou spotřebu energie a tím i provozní náklady. Tabulka níže popisuje přibližné hodnoty veličin směřodatných pro dimenzování pohonné soustavy městského elektromobilu.

| Veličina | Jednotky | Projektovaná hodnota |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 130 |
| Zrychlení 0 – 100 km.h ⁻¹ | [s] | 15 |
| Maximální dojezd | [km] | > 100 |
| Počet přepravovaných osob | [-] | 4 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | < 1200 |
| Užitečná hmotnost | [kg] | < 400 |

Tabulka 6 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu

2.1.2 Požadavky na pohonnou soustavu vozidla

Požadavky jsou specifikovány s ohledem na uvedené vlastnosti na každou část pohonné soustavy zvlášť (jednotlivé části viz obr. 1) a poté jsou doplněny o požadavky na pohonnou soustavu jako celek.

1. *Akumulátor* – U tohoto článku pohonné soustavy je určující především jeho kapacita Q [kWh] (v automobilovém průmyslu), její orientační volba se odvíjí od požadovaného dojezdu, který je projektovaný min. 100 km. Dále je kapacita omezena hmotností akumulátoru, která je požadována co nejnižší. V neposlední řadě volbu kapacity a typu

ovlivňuje i pořizovací cena akumulátoru, která musí být, jak vyplývá z vlastností z kap. 2.1.1, také na nízké úrovni. Protože je kapacita akumulátoru dána součinem jednotek [kW] a [h], pro její výpočet je důležité znát průměrný provozní výkon P_{pr} , který z akumulátoru bude odebírán, a čas t , po který bude tento výkon odebírán. Při požadovaném dojezdu s nejméně 100 km a uvažované průměrné rychlosti $v_{pr} \approx 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ se čas t vypočte dle jednoduché závislosti: $dt = \frac{ds}{dv} = \frac{100}{50} = 2 \text{ h}$. Ny- ní je potřeba znát průměrný provozní výkon P_{pr} . Ten bude vypočítán na základě maximálního výkonu motoru P_{max} , bude-li uvažováno, že $P_{pr} \approx 0,5 \cdot P_{max}$ s ohledem na zaručení dojezdu. Výpočtu optimálního maximálního výkonu motoru bude věnována samostatná kapitola, následně budou všechny vypočtené hodnoty zkompletovány a pohonný systém bude kompletně navržen. Při následném určení orientační optimální kapacity akumulátoru je třeba brát v úvahu další záporné faktory, jakými jsou:

- a. Zásobování ostatních elektrických zařízení ve vozidle (přístrojový štít, osvětlení, rádio, ventilátor, různé displeje atd.)
- b. Samovybíjení akumulátoru
- c. Nižší venkovní teploty než optimální pracovní teplota akumulátoru
- d. Ztráty ve vedení a regulaci elektrického proudu
- e. Mechanické ztráty v přenosových částech točivého momentu (ložiska, ozubená kola)
- f. Postupné mírné klesání kapacity akumulátoru (viz text níže)

Kladným faktorem, který ovlivňuje určení orientační optimální kapacity akumulátoru, je především rekuperační brzdění, se kterým bude v tomto modelu počítáno. Na výdrž akumulátoru bude mít podstatný vliv styl jízdy konkrétního řidiče, jeho schopnost využívat výhody elektrického pohonu, rychlost jízdy a také předvídavost.

Dalším požadavkem na akumulátor je vysoká životnost, kterou zaručuje výrobce. Zde jsou měřítkem tzv. počty dobíjecích cyklů, po které výrobce zaručuje stanovenou kapacitu akumulátoru (např. 80 % z původní). Dále musí akumulátor odolat havárii tak, aby nebyl nebezpečný svému okolí, také by při své kapacitě neměl být příliš těžký.

2. *Regulátor, řídicí jednotka* – Volba těchto zařízení se odvíjí od typu jednotlivých pohonných komponent, požadavky na tato zařízení jsou především:
 - a. Transformace na střídavý el. proud (pokud bude elektromobil poháněn střídavými elektromotory)
 - b. Plynulá a efektivní regulace výkonu elektromotorů
 - c. Informování řidiče o provozních údajích vozidla (především rychlost, otáčky, stav baterie, závady, údaje o elektrických zařízeních atd.)
3. *Elektromotor* – Požadavky na tento důležitý článek pohonné soustavy vycházejí z kapitoly 1.4.2:
 - a. Dostatečný výkon a točivý moment pro zaručení projektovaných výkonových hodnot vozidla. Zjednodušený výpočet potřebného výkonu elektromotoru bude vycházet z překonávání jízdních odporů, jakými jsou (uvažováno při jízdě po rovině ustálenou rychlostí):
 - i. Odpor valení.
 - ii. Odpor vzduchu.
 - iii. Odpor částí přenosové soustavy (reprezentován průměrnou účinností přenosu výkonu elektromotoru na kola).

Při řešení *odporu valení* lze vycházet z hodnot měření uvedených v příloze č. 1 na lehkém elektromobilu ZČU o hmotnosti $m_l = 450 \text{ kg}$, kde byla zjištěna hodnota valivého odporu O_{vall} při uvedených podmínkách 65 N. Pro potřeby koncepce malého městského elektromobilu je třeba upravit výpočty pro přibližnou

projektovanou pohotovostní hmotnost $m_2 = 1200$ kg. Pokud závisí hodnota valivého odporu O_{val1} na hmotnosti m přímo, lze jednoduchou úvahou pomocí poměru hmotností x stanovit O_{val2} pro tuto koncepci.

$$x = \frac{m_2}{m_1} = \frac{1200}{450} = 2,7$$

$$O_{val2} = x \cdot O_{val1} = 2,7 \cdot 65 = 175,5 \text{ N}$$

Valivý odpor lze uvažovat pro osobní automobily při nižších rychlostech přibližně konstantní, nad $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ se nepatrně zvyšuje s rostoucí rychlostí. Tento nárůst nebude uvažován.

Odporová síla vzduchu při jízdě je závislá na těchto parametrech:

- S_x ... čelní plocha [m²]
- v ... rychlost vozidla [m · s⁻¹]
- ρ ... hustota vzduchu [kg · m⁻³]
- c_x ... součinitel odporu vzduchu [-]

Pro výpočet odporové síly lze uvažovat následující hodnoty:

- S_x : Pro malý městský elektromobil se čelní plocha bude pohybovat mezi $1,6 \div 2 \text{ m}^2$, pro výpočet lze uvažovat $1,8 \text{ m}^2$.
- v : Vzhledem k tomu, že projektovaná maximální rychlost je $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, výpočetní hodnota by měla být vyšší, aby byl této rychlosti elektromobil schopen dosáhnout s dostatečnou rezervou. Do výpočtu bude uvažováno s rychlostí $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($= 42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).
- ρ : Průměrná hustota vzduchu při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a v nadmořské výšce 0 m n. m. činí $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- c_x : Hodnoty součinitelů odporu vzduchu pro moderní osobní automobily leží mezi $0,3 \div 0,4$. Pro výpočet se bude vycházet z hodnoty $0,37$ vzhledem k tomu, že se bude jednat o městské vozidlo, tudíž lze připustit horší aerodynamičnost karoserie na úkor funkčnosti a praktičnosti.

Tyto hodnoty lze dosadit do závislosti [1]: $O_v = c_x \cdot p_d \cdot S_x$

$$p_d = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \dots \text{ dynamický tlak}$$

$$O_v = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S_x$$

$$O_v = 0,37 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot 42^2 \cdot 1,8 = 0,705 \text{ kN}$$

Hodnota účinnosti přenosu výkonu na kola se bude odvíjet od druhu použitého přenosu a uspořádání přenosových částí, předběžně lze uvažovat, že mechanická účinnost přenosového ústrojí η_1 (tedy částí pohonné soustavy, které jsou při přenosu výkonu mezi koly a motorem) s uvažováním ztrát třením ozubených kol a ložisek dosahuje přibližně 95 %. Celková účinnost η_2 akumulátoru a přenosových a regulačních částí elektrické energie činí přibližně 80 %. Celková účinnost přenosu energie z akumulátoru na kola je:

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,95 \cdot 0,8 = 0,76 = 76 \%$$

- b. Dalšími požadavky na elektromotory jsou především: vysoká účinnost, průběh hodnot $P(n)$ a $M(n)$ podobný charakteristikám na obr. 22 a 23

4. *Přenosové části* – U těchto částí je požadováno především:
 - a. Přenos výkonu a točivého momentu na kola, jejich optimální rozložení mezi koly, případně nápravami při pohonu všech čtyř kol
 - b. Vysoká účinnost přenosu, technická jednoduchost
5. *Poháněná a vlečená kola* – specifikace požadavků:
 - a. Co nejnižší valivý odpor
 - b. Malá hmotnost
 - c. Případný dostatek zástavbového prostoru pro HUB elektromotor

2.1.3 Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky

Výpočet pro zajištění projektovaných hodnot bude vycházet z hodnot vypočtených v předchozí kapitole, pro přehlednost jsou uvedeny v následující tabulce:

| Veličina | Jednotka | Hodnota |
|---|----------|---------|
| t – průměrný čas odebrání el. proudu | [h] | 2 |
| O_v – odporová síla vzduchu (při $v = 150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) | [N] | 705 |
| O_{val} – valivý odpor | [N] | 175,5 |
| η_I – účinnost přenosových částí | - | 95 % |

Tabulka 7 Přehled vypočtených hodnot I

Prvním kritériem pro výpočet potřebného výkonu na hnacích kolech bude udržení projektované hodnoty maximální rychlosti při ideálních podmínkách, navýšené o rezervu, tedy $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, což činí přibližně $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud známe odporové síly, které musí elektromobil při této rychlosti překonat, lze aplikovat pro orientační výpočet následující závislost: $P_{K1} = (O_v + O_{val}) \cdot v$, ze které se potřebný výkon hnacího elementu dopočítá pomocí této závislosti: $P_{H1} = \frac{P_{K1}}{\eta}$, tedy:

$$P_{K1} = (705 + 175,5) \cdot 42 \cong 37000 \text{ W} \cong 37 \text{ kW}$$

$$P_{H1} = \frac{37000}{0,95} \cong 48700 \text{ W} \cong 48,7 \text{ kW}$$

Potřebný točivý moment pohonné jednotky lze získat ze závislosti:

$$M_{PH} = \frac{M_K}{i_c \cdot \eta_c}$$

Zde je třeba určit dvě neznámé. Pokud jsou uvažovány maximální otáčky běžného synchronního elektromotoru $n = 6000 \text{ ot. / min}$, průměr poháněného kola pro běžně užívané rozměry ráfků v této kategorii vozidel – R15 – je $d \cong 630 \text{ mm} (= 0,63 \text{ m})$ a požadovaná obvodová rychlost $v_o = 130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} (= 36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$, výpočet celkového převodového poměru i_c bude následující:

Maximální úhlová rychlost hřídele motoru:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \cong 630 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odpovídající obvodová rychlost kola:

$$v_{o2} = \omega \cdot \frac{d}{2} = 630 \cdot 0,315 \cong 198,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navrhovaný celkový převodový poměr vychází z předpokladu jednostupňové převodovky. Je možno jej určit jako poměr obvodových rychlostí v_o (max. požadovaná) a v_{o2} (odpovídající vypočtená bez převodu):

$$i_c = \frac{v_{o2}}{v_o} = \frac{198,5}{36} \cong 5,51$$

Potřebný moment M_K na kolech vozidla bude vycházet ze znalosti odporových sil (momentů):

$$M_K = (O_v + O_{val}) \cdot \frac{d}{2} = 880,5 \cdot 0,315 \cong 277,4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Odpovídající potřebný točivý moment pohonné jednotky M_H bude dle již uvedené závislosti:

$$M_H = \frac{277,4}{5,51 \cdot 0,95} \cong 53 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Druhým kritériem je projektovaná hodnota zrychlení z 0 na $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (přibližně $27,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), což je 15 s. S uvažováním odporu zrychlení lze zkontrolovat, za jakou dobu zrychlí elektromobil přibližně s výše navrženými parametry. V případě elektromotoru lze pro zjednodušení uvažovat zhruba konstantní točivý moment při zrychlování. Od hnací síly F_K , která je rovna součtu působících odporových sil $O = O_v + O_{val}$ při rychlosti $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (= 880,5 N) budou odečteny skutečné odporové síly a navíc je třeba uvažovat odpor zrychlení O_z , který způsobují jak rotující části přenosové soustavy a elektromotoru z důvodu setrvačnosti, tak posuvné zrychlení vozidla. Posuvná složka odporu zrychlení je určena dle jednoduché závislosti na základě D'Alembertova principu:

$$F = m \cdot a$$

Odpor zrychlení rotačních částí je reprezentován součinitelem vlivu rotujících částí ξ . Pro malý osobní elektromobil lze uvažovat hodnoty v rozmezí 1,04 – 1,4, bude počítáno s hodnotou $\xi = 1,1$. Celkový odpor zrychlení s uvažováním rotujících částí lze tedy definovat takto:

$$O_z = \xi \cdot m \cdot a = 1,1 \cdot (1200) \cdot a = 1320a \text{ N}$$

Hnací síla na kolech s uvažováním odporu zrychlení bude následující:

$$F_K = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S_x + O_{val} + O_z$$

$$880,5 = 0,37 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot v^2 \cdot 1,8 + 175,5 + 1320a$$

$$880,5 = 0,4v^2 + 175,5 + 1320a$$

$$a = \frac{705,5 - 0,4v^2}{1320}$$

Na základě takto upravené závislosti lze spočítat pro konkrétní rychlosti zrychlení a , které bude elektromobil schopen vyvinout při konstantní tažné síle na kolech $F_K = 880,5 \text{ N}$. Ze zna-

losti těchto zrychlení lze dopočítat jednotlivé přírůstky časů mezi intervaly rychlostí. Jejich součtem je pak čas t zrychlení z 0 na 27,78 m . s⁻¹. K tomu lze využít závislostí:

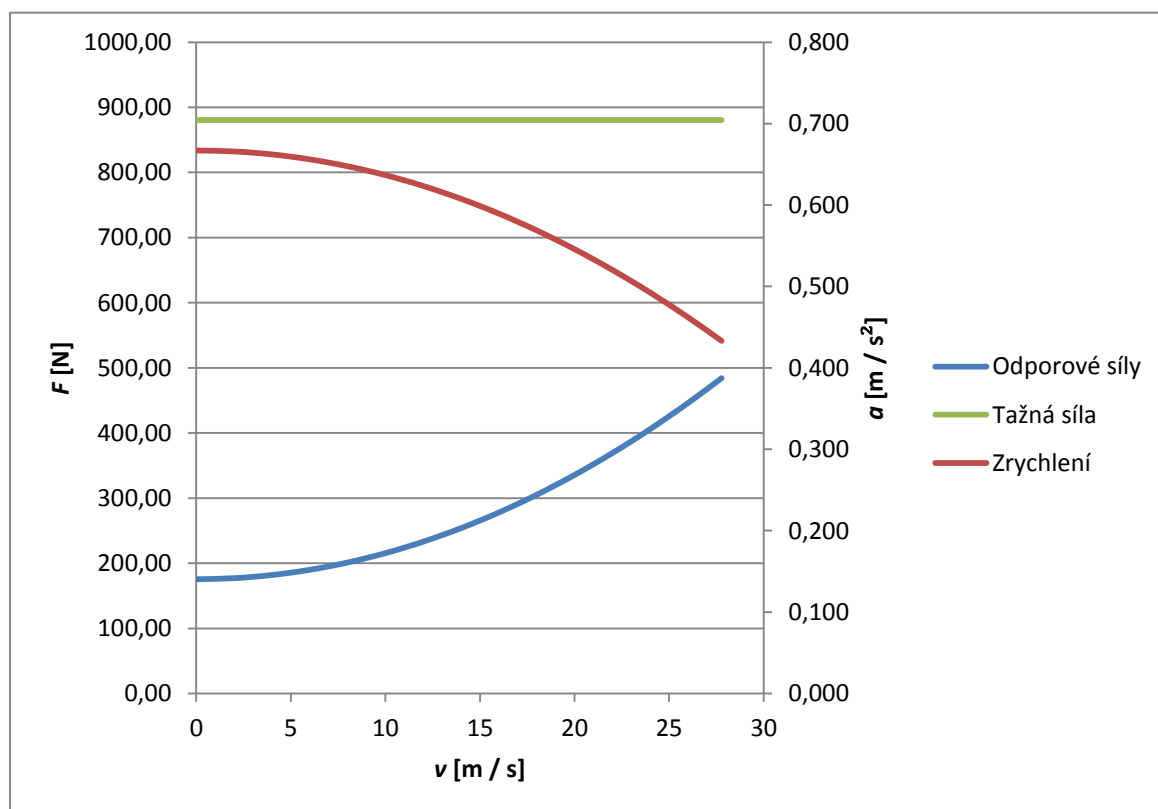
$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dt = \frac{dv}{a}$$

Pro přehlednost je možno sestavit graf této závislosti na základě tabulky vypočítaných hodnot (v [m . s⁻¹], F_K [N], O [N], a [m . s⁻²], dt [s]):

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 | 880,5 |
| O | 175,50 | 177,10 | 181,90 | 189,90 | 201,10 | 215,50 | 233,10 | 253,90 | 277,90 | 305,10 | 335,50 | 369,10 | 405,90 | 445,90 | 484,19 |
| a | 0,667 | 0,666 | 0,662 | 0,656 | 0,648 | 0,637 | 0,623 | 0,608 | 0,589 | 0,569 | 0,546 | 0,520 | 0,493 | 0,462 | 0,433 |
| dt | 0,000 | 3,004 | 3,020 | 3,048 | 3,088 | 3,141 | 3,208 | 3,291 | 3,393 | 3,516 | 3,664 | 3,843 | 4,061 | 4,327 | 4,109 |

Tabulka 8 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 880,5$ N

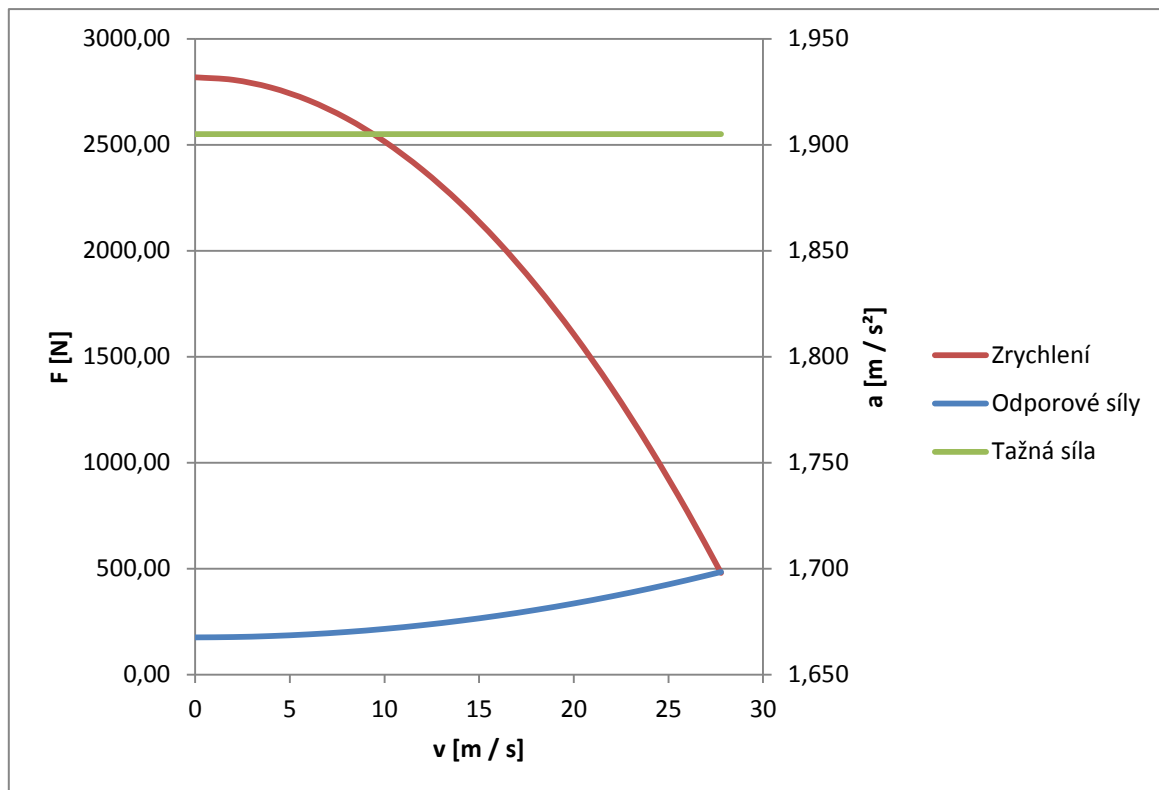


Obrázek 27 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Součet přírůstků časů mezi rychlostmi v grafu je 48,7 s. Je potřeba zvýšit tažnou sílu na kolech F_K , aby se tento součet přiblížil hodnotě 15 s. Optimalizací v tabulkovém procesoru lze dojít k hodnotě $F_K = 2550$ N. Při působení této síly bude výsledný čas $t = 15$ s:

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 | 2550 |
| O | 175,50 | 177,10 | 181,90 | 189,90 | 201,10 | 215,50 | 233,10 | 253,90 | 277,90 | 305,10 | 335,50 | 369,10 | 405,90 | 445,90 | 484,19 |
| a | 1,932 | 1,931 | 1,927 | 1,921 | 1,912 | 1,902 | 1,888 | 1,872 | 1,854 | 1,834 | 1,811 | 1,785 | 1,757 | 1,727 | 1,698 |
| dt | 0,000 | 1,036 | 1,038 | 1,041 | 1,046 | 1,052 | 1,059 | 1,068 | 1,079 | 1,091 | 1,105 | 1,120 | 1,138 | 1,158 | 1,048 |

Tabulka 9 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 2550$ N



Obrázek 28 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Potřebný točivý moment motoru pro dosažení této tažné síly je:

$$M_H = \frac{2550 \cdot \frac{0,63}{2}}{5,51 \cdot 0,95} \cong 153 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Pro výpočet potřebného výkonu hnací jednotky P_{H2} je třeba znát průměrnou rychlost v_{pr} při tomto zrychlování. Lze ji orientačně spočítat ze znalosti přírůstků časů dt při jednotlivých známých intervalech rychlosti dle následující závislosti:

$$v_{pr} = \sum_{i=1}^{13} \frac{\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2}\right) \cdot t_{i+1}}{t_c} \cong 14,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_{H2} = \frac{F_K \cdot v_{pr}}{\eta_1} = \frac{2550 \cdot 14,2}{0,95} \cong 38115 \text{ W} \cong 38,1 \text{ kW}$$

Z výpočtů vyplývá, že pro dosažení projektovaných parametrů s tímto druhem zpřevodování je třeba pohon o max. výkonu $P \geq 39 \text{ kW}$ a točivém momentu $M \geq 153 \text{ N} \cdot \text{m}$. Minimální

kapacita akumulátoru zásobující elektromotor o výkonu P , který je využíván průměrně na 50 % po dobu 2 h a při uvažování účinnosti přenosu el. energie $\eta_2 = 80 \%$, se stanoví:

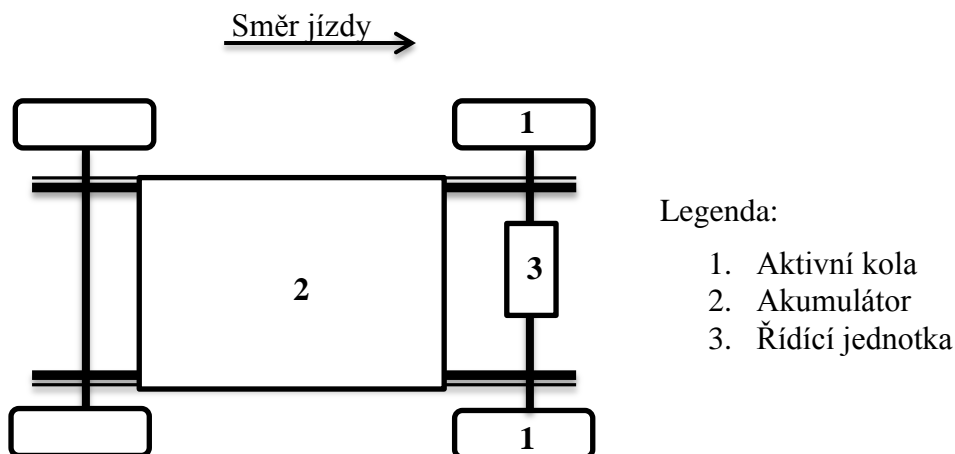
$$Q = \frac{P \cdot 0,5 \cdot t}{\eta_2} = \frac{39 \cdot 0,5 \cdot 2}{0,8} \cong 50 \text{ kWh}$$

2.1.4 Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů

Z hlediska koncepce uspořádání jsou rozhodující následující aspekty:

1. *Volba poháněných kol a jejich počtu* – Vzhledem k nejčastějším provozním podmínkám, kterými bude městská infrastruktura a tedy i předpokládané nenáročné adhezni podmínky, lze zvolit pohon pouze dvou kol, který bude dostačující a ekonomicky nenáročný. Volba předních či zadních kol bude v konečném důsledku ovlivňovat řešení interiéru a variabilitu prostoru. Pro snadnou ovladatelnost, manévrování a parkování na malých plochách bude výhodné, pokud převis karoserie v přední i zadní části bude co nejmenší. Z tohoto pohledu by bylo výhodnější zavazadlový prostor umístit do zadní části vozidla, která bude šikmá – vznikne tak vozidlo typu hatchback. Zavazadlový prostor vpředu by byl omezen výškou, variabilita interiéru (případně sklopení zadních sedadel a vytvoření většího ložného prostoru) by byla v tomto ohledu zne-možněna. Vzhledem k zachování zavazadlového prostoru v co největším objemu v rámci omezených rozměrů vozidla je třeba umístit pohonnou jednotku na opačnou stranu vozidla – tedy dopředu. Aby byla kinematická cesta co nejkratší a tedy i co nej-vyšší účinnost přenosu energie na kola, bude vhodnější volit pohon předních kol. Z hlediska jízdních a adhezni vlastností je toto řešení v případě malého městského elektromobilu vhodné.
2. *Volba typu elektromotoru a jeho umístění* – Elektromotor o maximálním výkonu $P = 39 \text{ kW}$ se nabízí ve dvou variantách vhodných pro pohon elektromobilu. Zásadní otázkou je volba jeho umístění:
 - a. V karoserii – Pro vozidla s vyšší předpokládanou cestovní rychlostí a výkonem motoru, případně s požadavky na sportovnější chování podvozku, nutnost přítomnosti přenosových částí.
 - b. V poháněných kolech – Pro vozidla, u nichž lze připustit velkou neodpruženou hmotnost v podobě elektromotorů přímo v kolech, odpadá nutnost řešení přenosové soustavy, je tedy zaručena vyšší efektivita přenosu energie na kola.

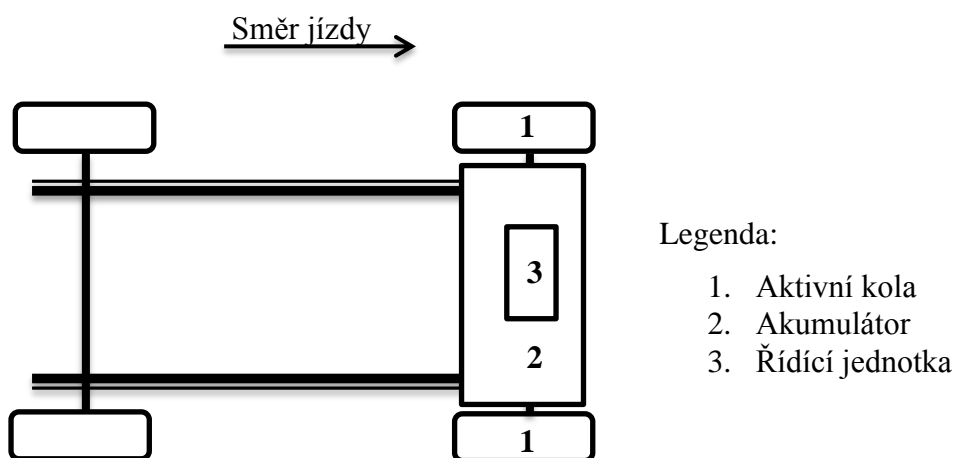
Vzhledem ke specifikovaným podmínkám provozu a celkové koncepci elektromobilu je výhodnějším řešením pohon elektromotory v kolech vozidla, konkrétně předních. Každý z motorů bude mít tedy přibližně poloviční výkon a točivý moment z projektovaných P_{H2} a M_H . Na následujícím schématu je zobrazen návrh uspořádání pohonných soustav:



Obrázek 29 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 1

Akumulátor o celkové kapacitě $Q = 50 \text{ kWh}$ je vhodné v návaznosti na kapitolu 1.5.2 volit ve provedení Li-ion. Umístit jej lze optimálně dle tohoto návrhu rovnoměrně pod podlahu vozidla. Alternativně se nabízí řešení umístit jej do přední části karoserie. Toto řešení však přináší řadu potenciálních nevýhod:

- Značné zatížení předních kol, s tím související nerovnoměrné rozložení hmotnosti vozidla ve prospěch přední části.
- Zvýšení těžiště vozidla, jednotlivé články akumulátoru by bylo nutné seskupovat v rámci omezených rozměrů přední části do větší výšky.
- Větší přední převis karoserie, možný omezený výhled z vozidla, zhoršená manévrovatelnost.



Obrázek 30 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 1 - alternativní řešení

2.1.5 Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů

Údaje v následující tabulce jsou projektované. V závislosti na reálném produktu, který bude zvolen dle těchto kritérií, a na technicko-ekonomických podmínkách se mohou případné skutečné technické údaje lišit.

| Elektromotor | | |
|-------------------------|---|------|
| Typ | stejnoseměrný BLDC, integrovaný v kole vozidla, umožňující rekuperativní brzdění | |
| Počet | 2 | |
| Výkon | [kW] | 19,5 |
| Točivý moment | [N . m] | 76,5 |
| Akumulátor | | |
| Typ | Li-ion | |
| Kapacita | [kWh] | 50 |
| Převodovka | | |
| Typ | jednostupňová, typ dle provedení konkrétního aktivního kola | |
| Celkový převodový poměr | [-] | 5,51 |
| Kola | | |
| Přední | aktivní, s BLDC elektromotorem, rozměry dle nabídky dodavatele (předpoklad dle výpočtů R15) | |
| Zadní | vlečená, rozměry dle předních kol | |

Tabulka 10 Přehled technických údajů koncepce č. 1

2.2 Koncepce č. 2 – elektromobil vyšší střední třídy

2.2.1 Charakteristika

Toto vozidlo bude sloužit k přesunu i na delší vzdálenosti. Bude využíváno k pohybu ve městě a především mimo město, kde bude nabízet při delších cestách vyšší cestovní komfort, dobré jízdní vlastnosti a výkony. Z hlediska rozměrů se bude jednat o poněkud větší vozidlo typu sedan. Elektromobil bude koncipován pro 5 osob včetně rozměrného prostoru pro zavazadla. Bude se jednat o vůz pro náročnější zákazníky s vyšším stupněm výbavy s reprezentativním vzhledem. Tabulka níže popisuje přibližné hodnoty veličin směrodatných pro dimenzování pohonné soustavy městského elektromobilu.

| Veličina | Jednotky | Projektovaná hodnota |
|--------------------|-------------------------|----------------------|
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 160 |

| | | |
|--|------|--------|
| Zrychlení 0 – 100 km . h ⁻¹ | [s] | 10 |
| Maximální dojezd | [km] | > 250 |
| Počet přepravovaných osob | [-] | 5 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | < 2000 |
| Užitečná hmotnost | [kg] | < 500 |

Tabulka 11 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu

2.2.2 Požadavky na pohonnou soustavu vozidla

Tyto požadavky vycházejí především z kapitoly 2.1.2, odlišnosti spočívají v konkrétních hodnotách technických parametrů jednotlivých částí.

1. *Akumulátor* – Jak bylo již uvedeno, kapacita akumulátoru je dána součinem jednotek [kW] a [h], pro její výpočet je důležité znát průměrný provozní výkon P_{pr} , který z akumulátoru bude odebírán, a čas t , po který bude tento výkon odebírán. Při požadovaném dojezdu s nejméně 250 km a uvažované průměrné rychlosti $v_{pr} \approx 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ se čas t vypočte dle jednoduché závislosti: $dt = \frac{ds}{dv} = \frac{250}{60} \cong 4,2 \text{ h}$. Je potřeba znát průměrný provozní výkon P_{pr} . Ten bude vypočítán stejně jako v kapitole 2.1.2, tedy $P_{pr} \approx 0,5 \cdot P_{max}$.
2. *Regulátor, řídicí jednotka* – Specifikace se neliší od koncepce č. 1.
3. *Elektromotor* – Je třeba určit konkrétní hodnoty jízdních odporů. Při řešení *odporu valení* lze vycházet opět z hodnot měření uvedených v příloze na lehkém elektromobilu ZČU o hmotnosti $m_1 = 450 \text{ kg}$, kde byla zjištěna hodnota valivého odporu O_{val1} při uvedených podmínkách 65 N. Pro potřeby koncepce elektromobilu vyšší střední třídy je třeba upravit výpočty pro přibližnou projektovanou hmotnost $m_2 = 2000 \text{ kg}$, tedy poměr pohotovostních hmotností:

$$x = \frac{m_2}{m_1} = \frac{2000}{450} \cong 4,44$$

$$O_{val2} = x \cdot O_{val1} = 4,44 \cdot 65 = 288,6 \text{ N}$$

Valivý odpor lze uvažovat pro osobní automobily při nižších rychlostech přibližně konstantní, nad 80 km . h⁻¹ se nepatrně zvyšuje s rostoucí rychlostí. Tento nárůst nebude uvažován.

Pro výpočet *odporové síly vzduchu* O_v lze uvažovat následující hodnoty:

- S_x : Pro koncepci č. 2 se čelní plocha bude pohybovat taktéž mezi 1,6 ÷ 2 m² vzhledem k předpokladu, že karoserie bude zřejmě širší, ale také zároveň nižší kvůli optimalizaci aerodynamických vlivů. Pro výpočet lze uvažovat také 1,8 m².
- v : Vzhledem k tomu, že projektovaná maximální rychlost je 160 km . h⁻¹, výpočetní hodnota by měla být vyšší, aby byl této rychlosti elektromobil schopen dosáhnout s dostatečnou rezervou. Do výpočtu bude tedy uvažováno s rychlostí 190 km . h⁻¹ (= 52,8 m . s⁻¹).
- ρ : Průměrná hustota vzduchu při teplotě 20 °C a v nadmořské výšce 0 m n. m. činí 1,2 kg . m⁻³.

- c_x : Hodnoty součinitelů odporu vzduchu pro moderní osobní automobily leží mezi 0,3 ÷ 0,4. Pro výpočet lze uvažovat lepší aerodynamické vlastnosti, než v případě městského elektromobilu, tedy přibližně 0,34.

$$O_v = 0.34 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot 52,8^2 \cdot 1,8 \cong 1,024 \text{ kN}$$

2.2.3 Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky

| Veličina | Jednotka | Hodnota |
|---|----------|---------|
| t – průměrný čas odebrání el. proudu | [h] | 4,2 |
| O_v – odporová síla vzduchu (při $v = 190 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) | [N] | 1024 |
| O_{val} – valivý odpor | [N] | 288,6 |
| η_I – účinnost přenosových částí | - | 95% |

Tabulka 12 Přehled vypočtených hodnot I

Výpočet potřebného výkonu na hnacích kolech vzhledem k dosažení projektované maximální rychlosti $v = 44,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$P_{K1} = (1024 + 288,6) \cdot 52,8 \cong 69300 \text{ W} \cong 69,3 \text{ kW}$$

$$P_{H1} = \frac{69300}{0,95} \cong 73000 \text{ W} \cong 73 \text{ kW}$$

Potřebný točivý moment s uvažováním maximálních otáček běžného synchronního elektromotoru $n = 6000 \text{ ot. / min}$, průměru poháněného kola o běžném rozměru ráfku pro danou kategorii – uvažováno R16 – $d \cong 700 \text{ mm}$ ($= 0,7 \text{ m}$) a požadované obvodové rychlosti $v_o = 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($= 44,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), se vypočítá:

Maximální úhlová rychlost hřídele motoru:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \cong 630 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odpovídající obvodová rychlost kola:

$$v_{o2} = \omega \cdot \frac{d}{2} = 630 \cdot 0,35 \cong 220,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navrhovaný celkový převodový poměr:

$$i_c = \frac{v_{o2}}{v_o} = \frac{220,5}{44,44} \cong 5$$

Potřebný moment M_K na kolech vozidla:

$$M_K = (O_v + O_{val}) \cdot \frac{d}{2} = 1312,6 \cdot 0,35 \cong 459,41 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Odpovídající potřebný točivý moment pohonné jednotky:

$$M_H = \frac{459,41}{5 \cdot 0,95} \cong 96,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Druhým kritériem je projektovaná hodnota zrychlení z 0 na 100 km . h⁻¹ (přibližně 27,8 m . s⁻¹), což je 10 s. Analogicky s koncepcí č. 1 bude počítáno s uvažováním hnací síly na kolech vozidla $F_K = O = O_v + O_{val}$ při rychlosti 52,8 m . s⁻¹ (= 1312,6 N) a součinitelem vlivu rotujících částí $\xi = 1,1$, celkový odpor zrychlení:

$$O_z = \xi \cdot m \cdot a = 1,1 \cdot (2000) \cdot a = 2200a \text{ N}$$

Hnací síla na kolech s uvažováním odporu zrychlení bude následující:

$$F_K = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S_x + O_{val} + O_z$$

$$1312,6 = 0,34 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot v^2 \cdot 1,8 + 288,6 + 2200a$$

$$1312,6 = 0,37v^2 + 288,6 + 2200a$$

$$a = \frac{1024 - 0,37v^2}{2200}$$

Na základě takto upravené závislosti lze spočítat pro konkrétní rychlosti zrychlení a , které bude elektromobil schopen vyvinout při konstantní tažné síle na kolech $F_K = 1312,6 \text{ N}$. Ze znalosti těchto zrychlení lze dopočítat jednotlivé přírůstky časů mezi intervaly rychlostí. Jejich součtem je pak čas t zrychlení z 0 na 27,78 m . s⁻¹. K tomu lze využít závislosti:

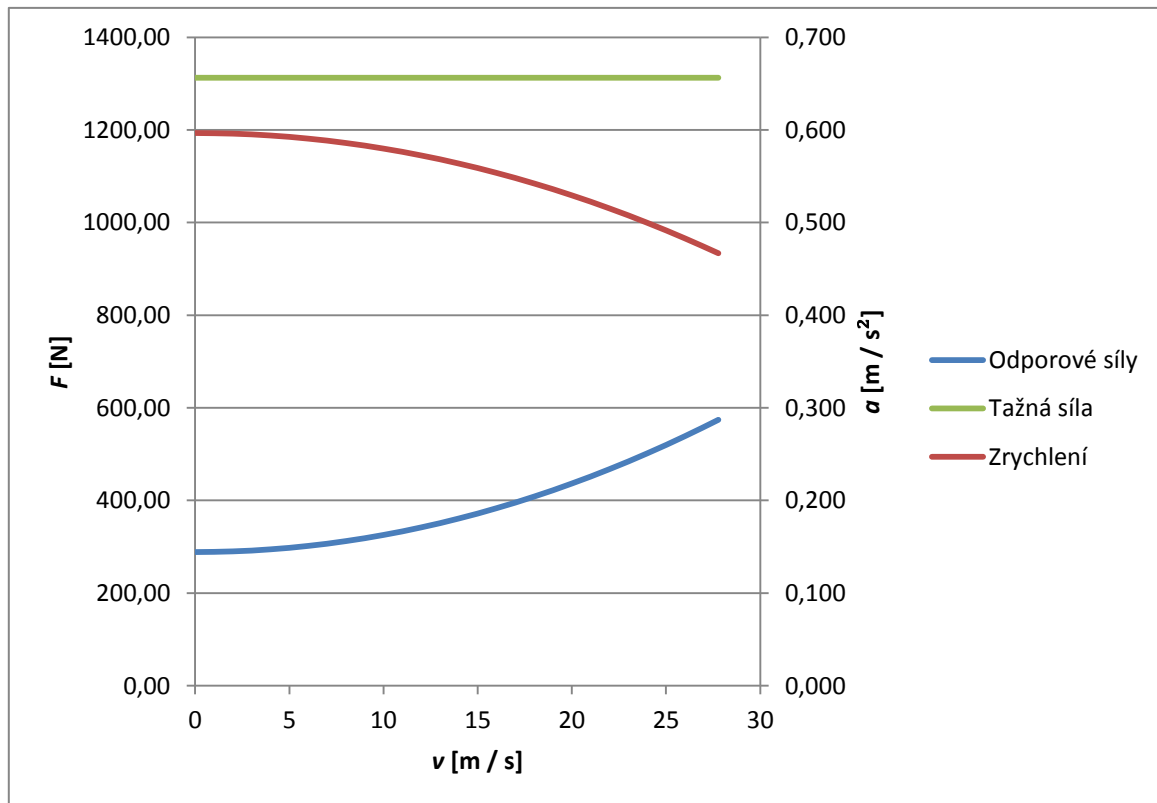
$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dt = \frac{dv}{a}$$

Pro přehlednost je možno sestavit graf této závislosti na základě tabulky vypočítaných hodnot (v [m . s⁻¹], F_K [N], O [N], a [m . s⁻²], dt [s]):

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 | 1312,6 |
| O | 288,60 | 290,08 | 294,52 | 301,92 | 312,28 | 325,60 | 341,88 | 361,12 | 383,32 | 408,48 | 436,60 | 467,68 | 501,72 | 538,72 | 574,14 |
| a | 0,597 | 0,596 | 0,594 | 0,591 | 0,586 | 0,580 | 0,572 | 0,564 | 0,554 | 0,542 | 0,529 | 0,515 | 0,500 | 0,483 | 0,467 |
| dt | 0,000 | 3,356 | 3,367 | 3,386 | 3,414 | 3,449 | 3,494 | 3,548 | 3,613 | 3,689 | 3,778 | 3,882 | 4,002 | 4,141 | 3,813 |

Tabulka 13 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 1312,6 \text{ N}$

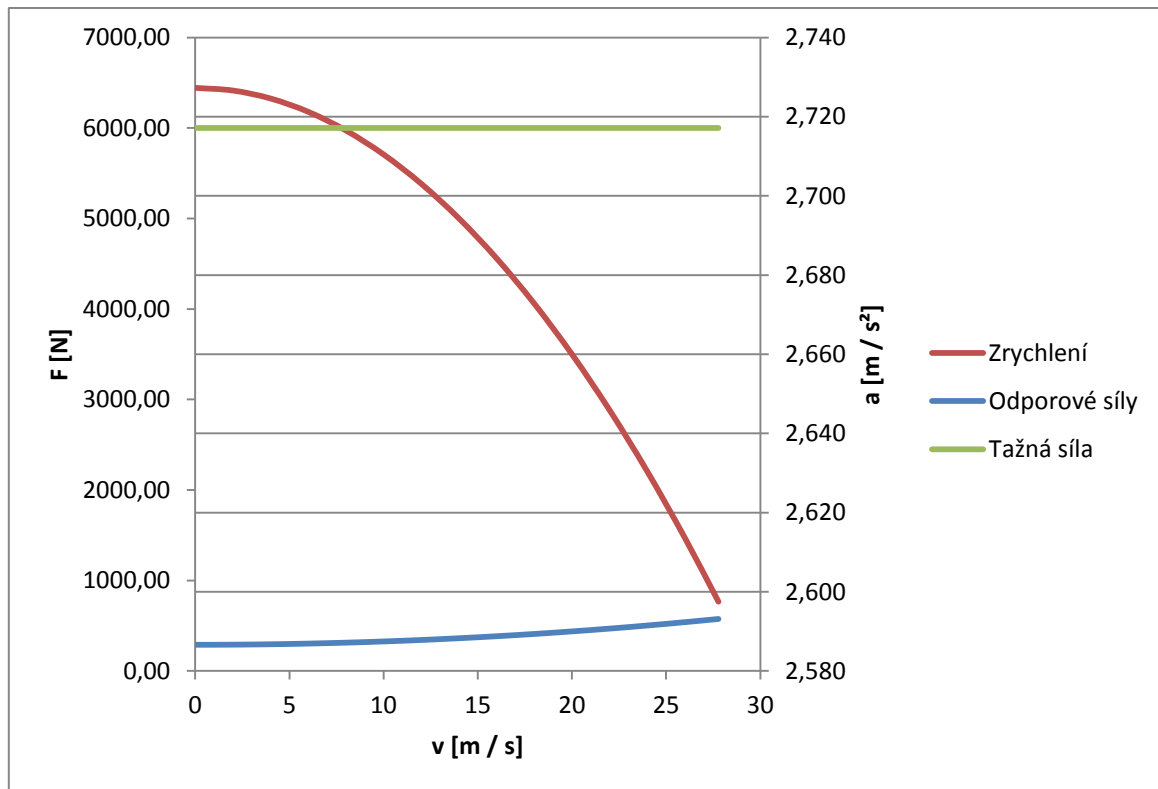


Obrázek 31 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Součet přírůstků časů mezi rychlostmi v grafu je přibližně 51 s. Je potřeba zvýšit tažnou sílu na kolech F_K , aby se tento součet přiblížil hodnotě 10 s. Optimalizací v tabulkovém procesoru lze dojít k hodnotě $F_K = 6000$ N. Při působení této síly bude výsledný čas $t = 10$ s:

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 |
| O | 288,60 | 290,08 | 294,52 | 301,92 | 312,28 | 325,60 | 341,88 | 361,12 | 383,32 | 408,48 | 436,60 | 467,68 | 501,72 | 538,72 | 574,14 |
| a | 2,727 | 2,727 | 2,725 | 2,721 | 2,717 | 2,710 | 2,703 | 2,694 | 2,684 | 2,673 | 2,660 | 2,646 | 2,630 | 2,614 | 2,597 |
| dt | 0,000 | 0,734 | 0,734 | 0,735 | 0,736 | 0,738 | 0,740 | 0,742 | 0,745 | 0,748 | 0,752 | 0,756 | 0,760 | 0,765 | 0,685 |

Tabulka 14 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 6000$ N



Obrázek 32 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Potřebný točivý moment elektromotoru pro dosažení této tažné síly je:

$$M_H = \frac{6000 \cdot \frac{0,7}{2}}{5 \cdot 0,95} \cong 442,2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Průměrná rychlost v_{pr} při tomto zrychlování:

$$v_{pr} = \sum_{i=1}^{13} \frac{\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2}\right) \cdot t_{i+1}}{t_c} \cong 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_{H2} = \frac{F_K \cdot v_{pr}}{\eta_1} = \frac{6000 \cdot 14}{0,95} \cong 38115 \text{ W} \cong 88,4 \text{ kW}$$

Z výpočtů vyplývá, že pro dosažení projektovaných parametrů *s tímto druhem zpřevodování* je třeba pohon o max. výkonu $P \geq 88,4 \text{ kW}$ a točivém momentu $M \geq 442 \text{ N} \cdot \text{m}$. Minimální kapacita akumulátoru zásobujícího elektromotor o výkonu P , který je využíván průměrně na 50 % po dobu 4,2 h a při uvažování účinnosti přenosu el. energie $\eta_2 = 80 \%$, se stanoví:

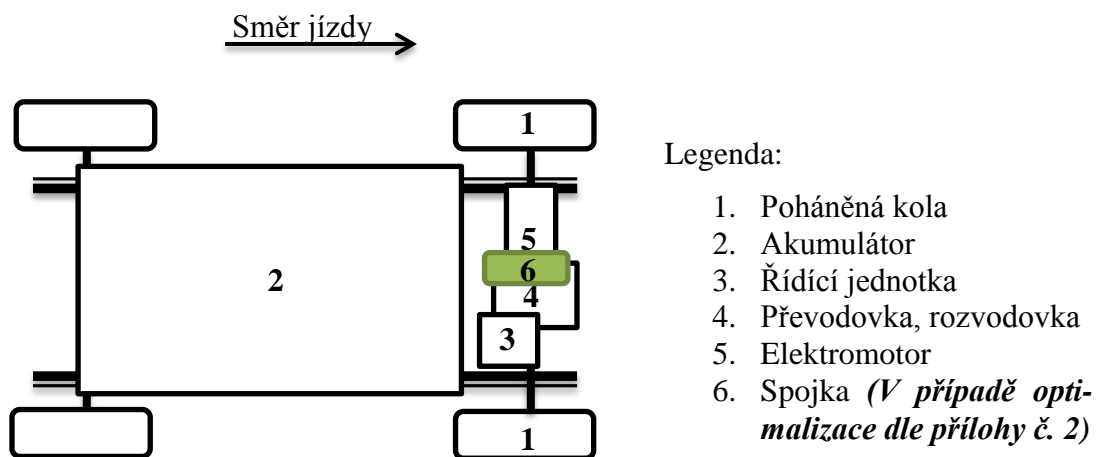
$$Q = \frac{P \cdot 0,5 \cdot t}{\eta_2} = \frac{88 \cdot 0,5 \cdot 4,2}{0,8} \cong 230 \text{ kWh}$$

Hodnota vypočteného točivého momentu pro požadované zrychlení je poměrně vysoká, důvodem je příliš velký převod i_c kvůli dosažení projektované maximální rychlosti. Bylo by velmi nevhodné navrhnout pro takový rozsah rychlostí pouze jednostupňovou převodovku. Řešení tohoto problému není podstatné pro návržení uspořádání pohonných soustav, proto je rozpracováno samostatně v příloze č. 2.

2.2.4 Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů

Z hlediska koncepce uspořádání jsou rozhodující následující aspekty:

1. *Volba poháněných kol a jejich počtu* – Vzhledem k nejčastějším provozním podmínkám, kterými bude především mimoměstský provoz a z menší části město a tedy i předpokládané nenáročné adhezní podmínky, lze zvolit pohon pouze dvou kol, který bude dostačující a ekonomicky nenáročný. Rozměry vozidla nejsou příliš omezeny, předpokládá se karoserie typu sedan se zavazadlovým prostorem vzadu, tedy zástavbový prostor pro části pohonné soustavy bude k dispozici především v přední a podvozkové části vozidla. Aby byla kinematická cesta co nejkratší a tedy i co nejvyšší účinnost přenosu energie na kola, bude vhodnější volit pohon předních kol. Z hlediska jízdních a adhezních vlastností je takové řešení v případě tohoto typu vozidla osvědčené.
2. *Volba typu elektromotoru a jeho umístění* – Elektromotor o maximálním výkonu $P = 88,4 \text{ kW}$ se nabízí opět ve dvou variantách dle umístění:
 - a. V karoserii – Pro vozidla s vyšší předpokládanou cestovní rychlostí a výkonem motoru, případně s požadavky na sportovnější chování podvozku, nutnost přítomnosti přenosových částí.
 - b. V poháněných kolech – Pro vozidla, u nichž lze připustit velkou neodpruženou hmotnost v podobě elektromotorů přímo v kolech, odpadá nutnost řešení přenosové soustavy, je tedy zaručena vyšší efektivita přenosu energie na kola.



Obrázek 33 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 2

Vzhledem ke specifikovaným podmínkám provozu a celkové koncepci elektromobilu je výhodnějším řešením umístit jej do karoserie vozidla, tedy přední části. Pro toto řešení se nabízí dva typy elektromotorů používané v elektromobilech: *střídavý synchronní* nebo *asynchronní*. Volba konkrétního motoru v praxi by závisela na aktuálních dodavatelských podmínkách, obecně vyšší účinnosti dosahují synchronní motory, asynchronní motory jsou obvykle cenově dostupnější. Pro vozidlo vyšší střední třídy lze preferovat tedy spíše synchronní elektromotor, vyšší náklady na pořízení budou vykompenzovány lepším využitím dodávané energie z akumulátorů.

Akumulátor o celkové kapacitě $Q = 230 \text{ kWh}$ je vhodné volit opět v osvědčeném provedení Li-ion. Umístit jej lze optimálně dle tohoto návrhu rovnoměrně pod podlahu vozidla, vnitřní rozměry tak budou omezeny pouze minimálně, rozložení hmotnosti bude optimálnější vzhle-

dem k tomu, že elektromotor, převodovka a rozvodovka se nachází v přední části vozidla. Také z hlediska zástavbových rozměrů je pravděpodobná komplikovanost umístění akumulátoru o takového kapacitě do přední části.

2.2.5 Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů

Údaje v následující tabulce jsou projektované. V závislosti na reálném produktu, který bude zvolen dle těchto kritérií, a na technicko-ekonomických podmínkách se mohou případné skutečné technické údaje lišit.

| Elektromotor | | |
|----------------------------------|---|--------------------------------|
| Typ | střídavý synchronní, v přední části karoserie, umožňující rekuperativní brzdění | |
| Počet | 1 | |
| Výkon | [kW] | 88,4 |
| Točivý moment | [N . m] | 442,2 / 225 (viz příloha č. 2) |
| Akumulátor | | |
| Typ | Li-ion | |
| Kapacita | [kWh] | 230 |
| Převodovka | | |
| Typ | jednostupňová / <i>třístupňová</i> (viz příloha č. 2) | |
| Celkový převodový poměr | [-] | 5 / I. 15,75 II. 7,35 III. 5 |
| Kola | | |
| Přední | Poháněná, hliníkové ráfky, snížený valivý odpor pneumatik, průměr kola 0,7 m | |
| Zadní | Vlečená, stejné parametry jako přední | |
| Elektrická zařízení | | |
| Řídící jednotka | Regulátor | |
| Měnič | | |
| Mechanické přenosové části | | |
| Rozvodovka s diferenciálem | Soustava hřídelů s homokinetickými klouby | |
| <i>Spojka</i> (viz příloha č. 2) | | |

Tabulka 15 Přehled technických údajů

2.3 Koncepce č. 3 – užitkový elektromobil

2.3.1 Charakteristika

Tento elektromobil bude určený k převozu lehkého nákladu do vzdálenosti 200 km, jeho celková hmotnost nepřesáhne 3,5 t. Předpokládá se koncepce skříňové karoserie s nejvýše dvěma místy k sezení včetně řidiče. Nejsou kladeny žádné náročnější bezpečnostní ani jízdní požadavky. Vozidlo by mělo dosahovat jízdních výkonů potřebných pro běžný provoz ve městě, mimo město a výjimečně i na dálnici. Tabulka níže popisuje přibližné hodnoty veličin směrodatných pro dimenzování pohonné soustavy městského elektromobilu.

| Veličina | Jednotky | Projektovaná hodnota |
|--|-------------------------|----------------------|
| Maximální rychlost | [km . h ⁻¹] | 120 |
| Zrychlení 0 – 100 km . h ⁻¹ | [s] | 25 |
| Maximální dojezd | [km] | > 200 |
| Počet přepravovaných osob | [-] | 2 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | < 1400 |
| Užitečná hmotnost | [kg] | < 2100 |

Tabulka 16 Hodnoty vybraných veličin elektromobilu

2.3.2 Požadavky na pohonnou soustavu vozidla

Tyto požadavky vycházejí opět z kapitoly 2.1.2:

1. *Akumulátor* – Požadovaný dojezd s pro výpočet kapacity je nejméně 200 km, průměrná rychlost bude uvažována $v_{pr} \approx 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a tedy čas t : $dt = \frac{ds}{dv} = \frac{200}{50} \cong 4 \text{ h}$. Průměrný provozní výkon $P_{pr} \approx 0,5 \cdot P_{max}$.
2. *Regulátor, řídicí jednotka* – Specifikace se neliší od koncepce č. 1.
3. *Elektromotor* – V návaznosti na již zmiňované měření lze při uvažování výpočtové hmotnosti $m_2 = \text{cca } 3000 \text{ kg}$ určit poměr pohotovostních hmotností:

$$x = \frac{m_2}{m_1} = \frac{3000}{450} \cong 6,66$$

$$O_{val2} = x \cdot O_{val1} = 6,66 \cdot 65 \cong 433 \text{ N}$$

Pro výpočet *odporové síly vzduchu* O_v lze uvažovat následující hodnoty:

- S_x : Pro koncepci č. 3 se čelní plocha bude pohybovat mezi $3 \div 6 \text{ m}^2$. Pro výpočet lze uvažovat $4,5 \text{ m}^2$.
- v : Vzhledem k tomu, že projektovaná maximální rychlost je $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, výpočetní hodnota by měla být vyšší, aby byl této rychlosti elektromobil schopen dosáhnout s dostatečnou rezervou. Do výpočtu bude uvažováno tedy s rychlostí $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} (= 38,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$.
- ρ : Průměrná hustota vzduchu při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a v nadmořské výšce 0 m n. m. činí $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- c_x : Hodnoty součinitelů odporu vzduchu pro dodávkové automobily se pohybují mezi $0,4 \div 0,8$. Pro výpočet lze uvažovat průměrnou hodnotu $0,6$.

$$O_v = 0,6 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot 38,9^2 \cdot 4,5 \cong 2,45 \text{ kN}$$

2.3.3 Výpočet potřebného výkonu a točivého momentu pohonné jednotky

| Veličina | Jednotka | Hodnota |
|---|----------|---------|
| t – průměrný čas odebrání el. proudu | [h] | 4 |
| O_v – odporová síla vzduchu (při $v = 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) | [N] | 2450 |
| O_{val} – valivý odpor | [N] | 433 |
| η_I – účinnost přenosových částí | - | 95% |

Tabulka 17 Přehled vypočtených hodnot I

Výpočet potřebného výkonu na hnacích kolech vzhledem k dosažení projektované maximální rychlosti $v = 38,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$P_{K1} = (2450 + 433) \cdot 38,9 \cong 112000 \text{ W} \cong 112 \text{ kW}$$

$$P_{H1} = \frac{112000}{0,95} \cong 118000 \text{ W} \cong 118 \text{ kW}$$

Potřebný točivý moment s uvažováním maximálních otáček běžného synchronního elektromotoru $n = 6000 \text{ ot. / min}$, průměru poháněného kola o běžném rozměru pro danou kategorii – uvažováno R16 – tedy $d \cong 700 \text{ mm} (= 0,7 \text{ m})$ a požadované obvodové rychlosti $v_o = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} (= 33,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$:

Maximální úhlová rychlost hřídele motoru:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \cong 630 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odpovídající obvodová rychlost kola:

$$v_{o2} = \omega \cdot \frac{d}{2} = 630 \cdot 0,35 \cong 220,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navrhovaný celkový převodový poměr:

$$i_c = \frac{v_{o2}}{v_o} = \frac{220,5}{33,33} \cong 6,6$$

Potřebný moment M_K na kolech vozidla:

$$M_K = (O_v + O_{val}) \cdot \frac{d}{2} = 2883 \cdot 0,35 \cong 1009 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Odpovídající potřebný točivý moment pohonné jednotky:

$$M_H = \frac{1009}{6,6 \cdot 0,95} \cong 161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Druhým kritériem je projektovaná hodnota zrychlení z 0 na 100 km . h⁻¹ (přibližně 27,8 m . s⁻¹), což je 25 s. Analogicky bude počítáno s uvažováním hnací síly na kolech vozidla $F_K = O = O_v + O_{val}$ při rychlosti 38,9 m . s⁻¹ (= 2883 N) a součinitelem vlivu rotujících částí $\xi = 1,1$, celkový odpor zrychlení:

$$O_z = \xi \cdot m \cdot a = 1,1 \cdot (3000) \cdot a = 3300a \text{ N}$$

Hnací síla na kolech s uvažováním odporu zrychlení bude následující:

$$F_K = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S_x + O_{val} + O_z$$

$$2883 = 0,6 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot v^2 \cdot 4,5 + 433 + 3300a$$

$$2883 = 1,62v^2 + 433 + 3300a$$

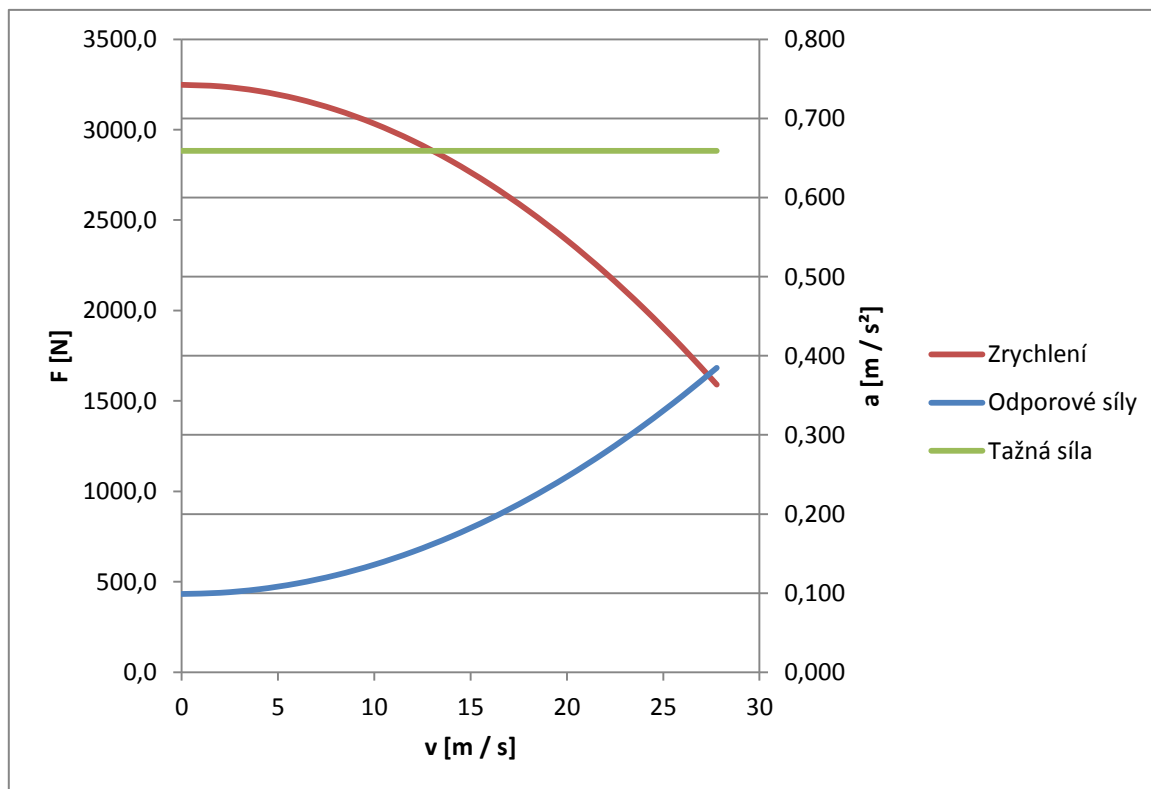
$$a = \frac{2450 - 1,62v^2}{3300}$$

Na základě takto upravené závislosti bude určeno pro konkrétní rychlosti zrychlení a , které bude elektromobil schopen vyvinout při konstantní tažné síle na kolech $F_K = 2883 \text{ N}$ a přírůstky času mezi jednotlivými intervaly rychlostí.

Graf této závislosti na základě tabulky vypočítaných hodnot bude vypadat následovně: (v [m . s⁻¹], F_K [N], O [N], a [m . s⁻²], dt [s]):

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 | 2883 |
| O | 433,0 | 439,5 | 458,9 | 491,3 | 536,7 | 595,0 | 666,3 | 750,5 | 847,7 | 957,9 | 1081,0 | 1217,1 | 1366,1 | 1528,1 | 1683,2 |
| a | 0,742 | 0,740 | 0,735 | 0,725 | 0,711 | 0,693 | 0,672 | 0,646 | 0,617 | 0,583 | 0,546 | 0,505 | 0,460 | 0,411 | 0,364 |
| dt | 0,000 | 2,701 | 2,723 | 2,760 | 2,813 | 2,885 | 2,977 | 3,095 | 3,243 | 3,428 | 3,663 | 3,962 | 4,351 | 4,871 | 4,896 |

Tabulka 18 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 2883 \text{ N}$

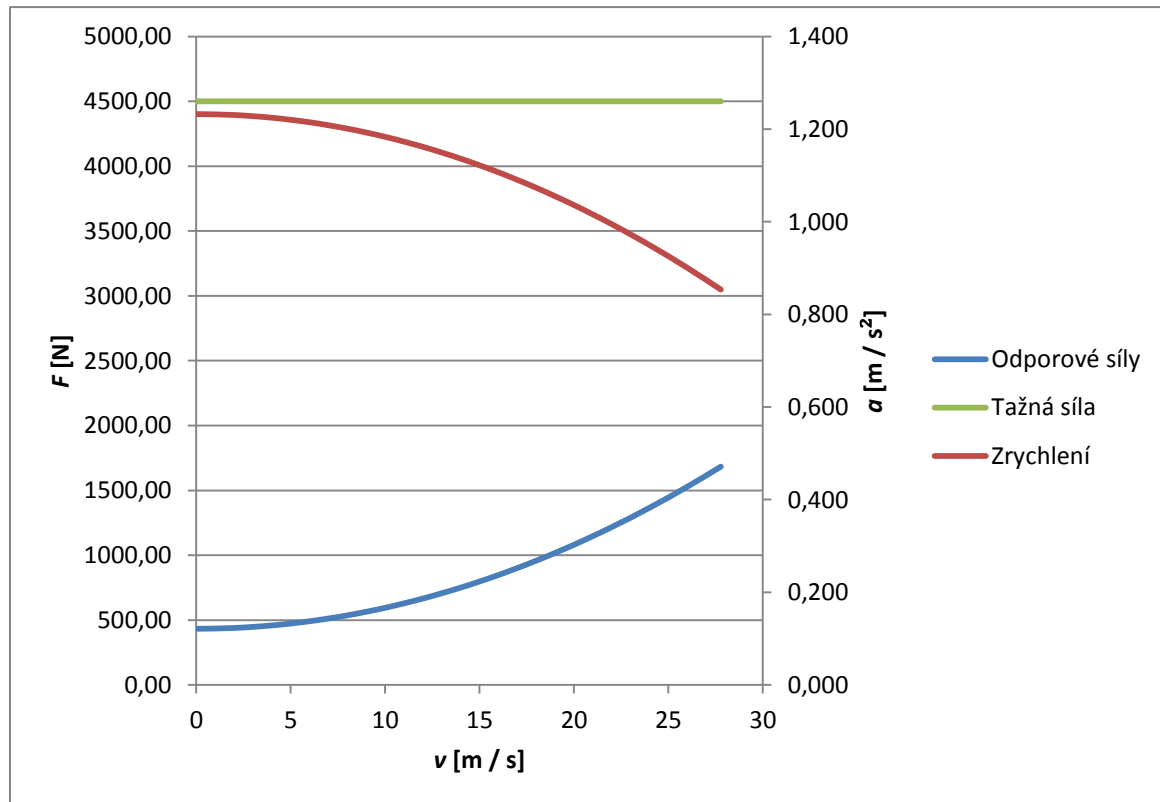


Obrázek 34 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Součet přírůstků časů mezi rychlostmi v grafu je přibližně 48 s. Optimální tažná síla bude $F_K = 4500$ N. Při působení této síly bude výsledný čas $t = 25,5$ s:

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 | 4500 |
| O | 433,0 | 439,5 | 458,9 | 491,3 | 536,7 | 595,0 | 666,3 | 750,5 | 847,7 | 957,9 | 1081,0 | 1217,1 | 1366,1 | 1528,1 | 1683,2 |
| a | 1,232 | 1,230 | 1,225 | 1,215 | 1,201 | 1,183 | 1,162 | 1,136 | 1,107 | 1,073 | 1,036 | 0,995 | 0,950 | 0,901 | 0,854 |
| dt | 0,000 | 1,625 | 1,633 | 1,646 | 1,665 | 1,690 | 1,722 | 1,760 | 1,807 | 1,863 | 1,930 | 2,010 | 2,106 | 2,221 | 2,085 |

Tabulka 19 Závislost velikosti zrychlení na rychlosti při $F_K = 4500$ N



Obrázek 35 Graf tažné síly, odporové síly a zrychlení

Potřebný točivý moment elektromotoru pro dosažení této tažné síly je:

$$M_H = \frac{4500 \cdot \frac{0,7}{2}}{6,6 \cdot 0,95} \cong 252 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Průměrná rychlost v_{pr} při tomto zrychlování:

$$v_{pr} = \sum_{i=1}^{13} \frac{\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2}\right) \cdot t_{i+1}}{t_c} \cong 14,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_{H2} = \frac{F_K \cdot v_{pr}}{\eta_1} = \frac{4500 \cdot 14,8}{0,95} \cong 70000 \text{ W} \cong 70 \text{ kW}$$

Z výpočtů vyplývá, že pro dosažení projektovaných parametrů s tímto druhem zpřevodování je třeba pohon o max. výkonu $P \geq 118 \text{ kW}$ a točivém momentu $M \geq 252 \text{ N} \cdot \text{m}$. Minimální kapacita akumulátoru zásobujícího elektromotor o výkonu P , který je využíván průměrně na 70 % po dobu 4 h a při uvažování účinnosti přenosu el. energie $\eta_2 = 80 \%$, se stanoví:

$$Q = \frac{P \cdot 0,5 \cdot t}{\eta_2} = \frac{118 \cdot 0,5 \cdot 4}{0,8} \cong 295 \text{ kWh}$$

I v případě této koncepce je vhodná optimalizace převodového ústrojí na úkor technické jednoduchosti – v případě většího zatížení s jednostupňovou převodovkou mohou nastat problémy při rozjezdech nebo např. při výraznějším stoupání, návrh na optimalizaci je také též uveden v příloze č. 2.

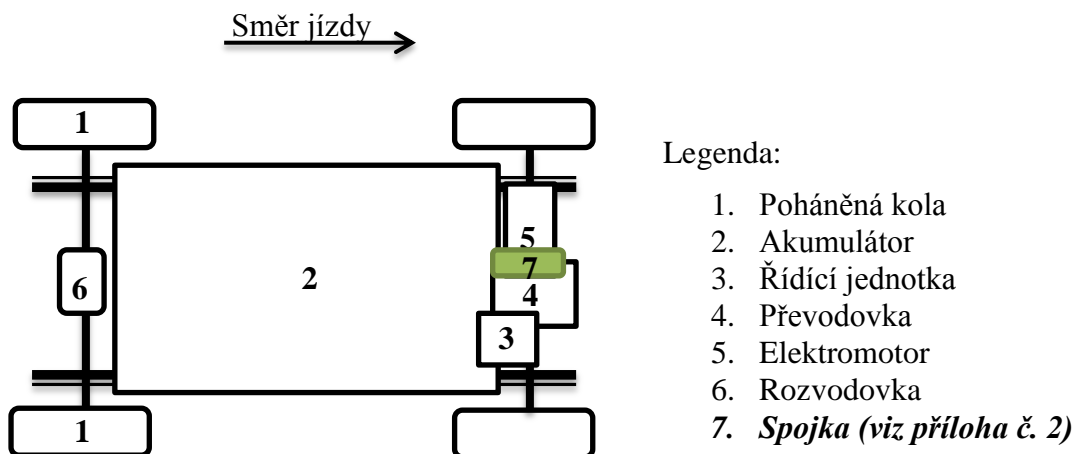
2.3.4 Uspořádání částí pohonné soustavy na základě vypočtených údajů

Z hlediska koncepce uspořádání jsou rozhodující následující aspekty:

1. *Volba poháněných kol a jejich počtu* – Vzhledem k určení vozidla lze předpokládat nenáročné adhezni podmínky a tedy zvolit pohon pouze dvou kol, který bude dostačující a ekonomicky nenáročný. Karoserie bude skříňového typu, tedy se dvěma místy k sezení včetně řidiče vpředu a užitkovým prostorem ve střední a zadní části vozidla v celé výšce. S přihlédnutím k častému využití nákladního prostoru a tedy i zatížení zadní části vozidla je vhodnější volit zadní pohon. Využitelný zástavbový prostor pro pohon bude tak v přední části vozidla.
2. *Volba typu elektromotoru a jeho umístění* – Elektromotor o maximálním výkonu $P = 118 \text{ kW}$ se nabízí opět ve dvou variantách dle umístění:
 - a. V karoserii – Pro vozidla s vyšší předpokládanou cestovní rychlostí a výkonem motoru, případně s požadavky na sportovnější chování podvozku, nutnost přítomnosti přenosových částí.
 - b. V poháněných kolech – Pro vozidla, u nichž lze připustit velkou neodpruženou hmotnost v podobě elektromotorů přímo v kolech, odpadá nutnost řešení přenosové soustavy, je tedy zaručena vyšší efektivita přenosu energie na kola.

Vzhledem ke specifikovaným podmínkám provozu a předpokládanému zatížení nápravy je vhodnější umístit jej do karoserie vozidla, tedy přední části. Pro toto řešení se nabízí dva typy elektromotorů používané v elektromobilech: *střídavý synchronní* nebo *asynchronní*. Volba konkrétního motoru v praxi by závisela opět na aktuálních dodavatelských podmínkách, synchronní motor dosahuje vyšší efektivitu.

Akumulátor o celkové kapacitě $Q = 295 \text{ kWh}$ je vhodné volit opět v osvědčeném provedení Li-ion. Umístit jej lze optimálně dle tohoto návrhu rovnoměrně pod podlahu vozidla, vnitřní rozměry tak budou omezeny pouze minimálně, rozložení hmotnosti bude optimálnější vzhledem k tomu, že elektromotor a převodovka se nachází v přední části vozidla.



Obrázek 36 Uspořádání pohonných soustav koncepce č. 3

2.3.5 Návrh jednotlivých částí pohonné soustavy včetně technických parametrů

Údaje v následující tabulce jsou projektované. V závislosti na reálném produktu, který bude zvolen dle těchto kritérií, a na technicko-ekonomických podmínkách, se mohou případné skutečné technické údaje lišit.

| Elektromotor | | |
|----------------------------------|---|------------------------------------|
| Typ | střídavý synchronní, v přední části karoserie, umožňující rekuperativní brzdění | |
| Počet | 1 | |
| Výkon | [kW] | 118 |
| Točivý moment | [N . m] | 252 / 190 (viz příloha č. 2) |
| Akumulátor | | |
| Typ | Li-ion | |
| Kapacita | [kWh] | 295 |
| Převodovka | | |
| Typ | jednostupňová / <i>třístupňová</i> (viz příloha č. 2) | |
| Celkový převodový poměr | [-] | 6,6 / I. 26,25 II. 11,3 III. 6,6 |
| Kola | | |
| Přední | Vlečená, hliníkové ráfky, snížený valivý odpor pneumatik, průměr kola 0,7 m | |
| Zadní | Poháněná, stejné parametry jako přední | |
| Elektrická zařízení | | |
| Řídící jednotka | | Regulátor |
| Měnič | | |
| Mechanické přenosové části | | |
| Rozvodovka s diferenciálem | | Soustava hřídelů (podélný, příčný) |
| <i>Spojka</i> (viz příloha č. 2) | | |

Tabulka 20 Přehled technických údajů

2.4 Zhodnocení navržených parametrů

Navržené technické parametry jsou v souladu s předpoklady a určením konkrétních elektromobilů. Korektnost vypočtených hodnot je třeba ověřit na prototypch a optimalizovat podle dosažených výsledků, je možné je však brát v rámci experimentů jako výchozí. Při výpočtech byla uvažována řada zjednodušení, jako například:

- předpoklad konstantního točivého momentu elektromotoru v celém spektru otáček
- předpoklad konstantního valivého odporu při rostoucí rychlosti vozidla
- odhad hodnot některých součinitelů, účinností a hmotností na základě dostupných informací

Pro větší konkretizaci jednotlivých částí, jejich parametrů a použitých technologií bude třeba využít znalosti dalších odborníků z vědních oblastí, které se jednotlivými pohonnými částmi zabývají. Pro vznik reálného elektromobilu je toto nutným předpokladem.

V neposlední řadě bude při vývoji a následné výrobě elektromobilů hrát svoji roli ekonomičnost, která ovlivní jak způsob případné výroby, tak samotný výběr konkrétních článků pohonné soustavy. Výsledný produkt by měl být co nejvíce konkurenceschopný, je třeba zvolit správný poměr kvality, výkonnosti použité technologie a ceny. Rozhodujícím pro tuto volbu bude především zákazník, pro kterého bude elektromobil určen. Na aktuálním trhu elektromobilů zatím bohužel chybí takový produkt, který by byl v rámci sériové výroby do jisté míry cenově a prakticky dostupný pro širší spektrum zákazníků. Právě navržená koncepce č. 1 s důrazem na nízkou cenu může být však základem pro řešení této situace. Koncepce č. 2 naráží při své aplikaci na konkurenci v podobě vozidel značky Tesla. Oproti Tesle by však měla být při zhoršených jízdních parametrech cenově dostupnější. Určitá míra cestovního komfortu a reprezentativnosti by měla být zachována. Poslední navržená koncepce – užitkový elektromobil – je východiskem pro rozšířenou aplikaci elektropohonu do tohoto odvětví. Při počáteční vyšší investici by v případě kratších vzdáleností vykazoval velmi nízké provozní náklady. Ekologičnost provozu by mohla být předpokladem pro řadu dotací.

Závěr

Tato bakalářská práce byla primárně zaměřena na návrh uspořádání pohonných soustav elektromobilu. První část práce byla věnována obecným informacím a také vlastním důvodům, proč se samotným elektrickým pohonem v silničních vozidlech zabývat. Její čtenáře seznámila postupně s jednotlivými prvky pohonné soustavy elektricky poháněných vozidel.

Problematika takového pohonu byla skloňována již v dobách prvních osobních vozidel. Jako důsledek záměru navrhnout vlastní koncepční řešení tedy bylo vhodné nahlédnout do historie i současnosti, analyzovat koncepce, technické parametry, slabé i silné stránky a příčiny jejich neúspěchů neopakovat. U každého vozidla se popis zaměřil především na pohonné prvky, jejich technické parametry a z velké části na jejich umístění – výstupem těchto informací bylo vždy zjednodušené schéma koncepce vozidla včetně popisů.

Dále byly charakterizovány jednotlivé články pohonné soustavy, samostatné kapitoly se věnovaly elektromotorům, akumulátorům a následně přehledu koncepčních řešení elektromobilů, které byly popsány. V tomto přehledu byla detailněji zanalyzována a zhodnocena umístění jednotlivých částí s cílem položit teoretický základ pro určení vlastního konceptu.

Aplikační část práce byla uvedena specifikací požadavků na tři různé koncepce vozidel z různých oblastí trhu, které bylo při navrhování třeba dodržet. První koncepcí se stal malý městský elektromobil, který vsadil na svoji plánovanou cenovou dostupnost, technickou jednoduchost a praktičnost. Pro návrh koncepce je důležité dimenzování hlavních pohonných částí, jakými jsou motor a akumulátor, okrajově pak i přenosové části. Na základě navrhovaných parametrů byly nejdříve stanoveny obecné výpočty. Na základě znalosti jízdních odporů a s uvažováním jízdních požadavků byl vypočten požadovaný výkon elektromotoru a točivý moment pro udržení maximální rychlosti, následně pak pro dosažení požadovaného zrychlení. Při výpočtech byly využity i výsledky experimentálního měření valivého odporu kol, jehož zpráva je v příloze. Pro optimalizaci řešení potřebného točivého momentu elektromotoru při uvažování požadavku na čas zrychlení bylo využito tabulkového procesoru Microsoft Excel, který vše propojil s grafem. Při výpočtech byly využity některé zjednodušující předpoklady, jako například konstantní průběh některých parametrů nebo jejich zanedbání, pokud tím příliš neovlivnily konečný výsledek. Na základě těchto výpočtů a dosažení konkrétních hodnot byla pohonná soustava dimenzována a tedy mohl být navržen i koncept vozidla.

Stejným způsobem se postupovalo i v případě koncepcí č. 2 a 3. Konkrétně druhá koncepce se zaměřila na vyšší cestovní komfort a jízdu na delší vzdálenosti i mimo město. Při specifikaci požadavků na třetí koncepci byla uvažována i užitková sféra dopravy – tedy běžný typ vozidla se skříňovou karosérií, kde by implementace elektromotoru na kratší vzdálenosti mohla znamenat značné provozní úspory a také zvýšení ekologičnosti provozu.

Výsledky práce mohou posloužit jako podklad pro zhotovení prototypu elektromobilu ve spolupráci s odborníky dalších souvisejících odvětví, především elektrotechniky. Testováním prototypu a optimalizací komponentů by mohl vzniknout konečný podklad pro výrobu elektromobilu v sériové výrobě.

Je třeba dále hledat vhodné technologie výroby těchto energeticky efektivnějších vozidel, zkoumat vhodné materiály a především způsob produkce akumulátorů, které určují vysoké procento z výsledné kvality elektromobilu a možného využití. V dohledné budoucnosti je transformace na jiný typ pohonu v tomto velmi důležitém odvětví, jakým je celosvětově doprava, nezbytná. Nezbytvá než věřit a přispět k tomu, aby jiné technologie, ať už s využitím zmiňovaného elektropohonu nebo pohonu jiného, úspěšně a včas nahradily technologie současné a zároveň umožnily mnohem efektivnější, ekologičtější a trvale udržitelné získávání energie.

Použitá literatura

- [1] KEMKA, V. *Mechanika jízdy. 8. přednáška z předmětu KKS/ZDMT*. Plzeň : ZČU v Plzni, 2011.
- [2] INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS. *When will oil run out?* [Online] 2014. [Citace: 20. říjen 2014.] <http://www.imeche.org/knowledge/themes/energy/energy-supply/fossil-energy/when-will-oil-run-out>.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS. *Production-statistics*. [Online] 2014. [Citace: 20. říjen 2014.] <http://www.oica.net/category/production-statistics>.
- [4] —. *Total-in-use-2012*. [Online] 2014. [Citace: 21. říjen 2014.] <http://www.oica.net/wp-content/uploads/Total-in-use-2012.pdf>.
- [5] TESLA MOTORS, INC. *model-s-photo-gallery-10.jpg*. [Online] 2014. [Citace: 23. říjen 2014.] http://www.teslamotors.com/sites/default/files/blog_images/model-s-photo-gallery-10.jpg.
- [6] IDAHO NATIONAL LABORATORY. Hybrid Electric Vehicles. *Advanced Vehicle Testing Activity*. [Online] Srpen 2014. [Citace: 23. říjen 2014.] <http://avt.inl.gov/hev.shtml>.
- [7] —. Plug-in Hybrid Electric Vehicles/Extended Range Electric Vehicles. *Advanced Vehicle Testing Activity*. [Online] Srpen 2014. [Citace: 23. říjen 2014.] <http://avt.inl.gov/phev.shtml>.
- [8] EDISON TECH CENTER. *Electric Cars and History*. [Online] 2013. [Citace: 25. říjen 2014.] <http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html#baker>.
- [9] IDAHO NATIONAL LABORATORY. Advanced Vehicle Testing Activity. *The History of Electric Cars*. [Online] 2014. [Citace: 25. říjen 2014.] <http://avt.inl.gov/pdf/fsev/history.pdf>.
- [10] MILES, DUSTIN O., A DALŠÍ. *Baseline tests of the batronic minivan electric delivery van*. Cleveland, Ohio : National Aeronautics and Space Administration, 1977. NASA TM-73761.
- [11] HRMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. Praha : Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [12] HOVIS, M. InsideEVs Exclusive Interview with General Motors EV1 Marketing Director John Dabels – Part 1. *Inside Evs*. [Online] Inside Evs, 2014. [Citace: 11. listopad 2014.] <http://insideevs.com/insideevs-exclusive-interview-with-general-motors-ev1-marketing-director-john-dabels-part-1/>.
- [13] SHNAYERSON, M. *The Car that Could: The Inside Story of GM's Revolutionary Electric Vehicle*. New York : Random House, 1996. 067942105X.
- [14] COBB, J. June 2014 Dashboard. *hybridCARS*. [Online] 2. červenec 2014. [Citace: 11. listopad 2014.] <http://www.hybridcars.com/june-2014-dashboard/>.
- [15] HODGETTS, C. Review> Tesla's trance. *The architect's newspaper*. [Online] 26. březen 2013. [Citace: 24. listopad 2014.] <http://archpaper.com/news/articles.asp?id=6565#.VHMNWouG91Y>.
- [16] NETWORK, TESLARATI. *Tesla Model S Weight Distribution*. [Online] 19. červenec 2013. [Citace: 24. listopad 2014.] <http://www.teslarati.com/tesla-model-s-weight/>.

- [17] LMC AUTOMOTIVE. Tesla sales beating Mercedes, BMW and Audi. *CNN Money*. [Online] 13. květen 2013. [Citace: 24. listopad 2014.] <http://money.cnn.com/2013/05/13/autos/tesla-sales-bmw-mercedes-audi/>.
- [18] NISSAN MOTOR CORPORATION. Nissan Leaf. *Nissan motor corporation*. [Online] 2014. [Citace: 24. listopad 2014.] <http://www.nissan-global.com/EN/NISSAN/LEAF/>.
- [19] —. Leaf (2010-2013). *Nissan newsroom Europe*. [Online] 18. říjen 2010. [Citace: 24. listopad 2014.] <http://www.newsroom.nissan-europe.com/EU/en-gb/LEAF/Product/Other.aspx>.
- [20] NISSAN ČESKÁ REPUBLIKA. Nový Nissan Leaf. *Nissan*. [Online] 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] <http://www.nissan.cz/CZ/cs/vehicle/electric-vehicles/leaf.html>.
- [21] LOVEDAY, E. BMW i3 Sales Surpass 10,000 Worldwide. *Inside EVs*. [Online] Říjen 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] <http://insideevs.com/bmw-i3-sales-surpass-10000-worldwide/>.
- [22] HORČÍK, J. BMW i3: Cena, dojezd, specifikace. *Hybrid.cz*. [Online] 6. listopad 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] <http://www.hybrid.cz/bmw-i3-cena-dojezd-specifikace>.
- [23] BMW. Technická data. *BMW*. [Online] 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] http://www.bmw.cz/cz/cs/newvehicles/i/i3/2013/showroom/technical_data.html.
- [24] MIČKA, J. BMW i3 – Elektrická revoluce. *Auto.cz*. [Online] 3. únor 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] <http://www.auto.cz/test-bmw-i3-elektricka-revoluce-79318>.
- [25] BMW OF NORTH AMERICA. The all-new BMW i3 with range extender. *BMW*. [Online] 2014. [Citace: 29. listopad 2014.] <http://www.bmwusa.com/standard/content/Zmag.aspx?id=77a77acd-273e-47c7-bafd-67f5d9d40af0>.
- [26] SVÁTA, J. Elektromobil Volkswagen e-Up! se představuje. *Hybrid.cz*. [Online] 14. březen 2013. [Citace: 30. listopad 2014.] <http://www.hybrid.cz/elektromobil-volkswagen-e-se-predstavuje>.
- [27] VOLKSWAGEN. e-up! *VW Das Auto*. [Online] 2014. [Citace: 30. listopad 2014.] <http://www.volkswagen.cz/modely/e-up/galerie>.
- [28] —. Electric Motor. *VW Das Auto*. [Online] 2014. [Citace: 30. listopad 2014.] <http://www.volkswagen.co.uk/technology/electric-technology/electric-motor>.
- [29] —. Technická data. *VW Das Auto*. [Online] 2014. [Citace: 30. listopad 2014.] http://www.volkswagen.cz/modely/e-up/ceniky_a_data/technicka_data.
- [30] —. 2015 e-Golf Technical Specifications. *media.vw.com*. [Online] 2014. [Citace: 30. listopad 2014.] http://media.vw.com/doc/1142/2015_volkswagen_e-golf_versatile_fun-to-drive_and_with_zero_tailpipe_emissions-2015_e-golf_specifications-88829706253fe01587e9c3.pdf.
- [31] VW DAS AUTO. Galerie. *VW Das Auto*. [Online] 2014. [Citace: 12. prosinec 2014.] <http://www.volkswagen.cz/modely/e-golf/galerie>.
- [32] ENDLESS-SPHERE. SR1 EV1 Electric Baja Race Buggy. *Endless Sphere Technology*. [Online] 2012. [Citace: 14. prosinec 2014.] <http://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?f=34&t=46406v>.

- [33] MACKENZIE, A. Strategic Recovery Institute develops electric off-road racing vehicle. *gizmag*. [Online] 13. únor 2013. [Citace: 28. prosinec 2014.] <http://www.gizmag.com/sri-electric-off-road-racer/26242/>.
- [34] KOTLAN, V. Poznámky pro studenty kombinovaného studia - předmět KTE/E. *Studijní poznámky*. Plzeň : KOTLAN, V., 2014.
- [35] NOVÁK, I. ICT v učivu elektromotorů na SŠ. *emotor.cz*. [Online] Ostravská univerzita v Ostravě, 2008-2015. [Citace: 8. leden 2015.] <http://emotor.cz/>.
- [36] —. Asynchronní elektromotor třífázový. *emotor.cz*. [Online] Ostravská univerzita v Ostravě, 2008-2015. [Citace: 8. leden 2015.] <http://emotor.cz/asynchronni-elektromotor-trifazovy.htm>.
- [37] ŠIMON, J. *Jak se dělá elektromotor*. 2, Praha : FCC Public s. r. o., 2011. ISSN 1210-0889.
- [38] ČUPERA, J. Správný tlak šetří nejen peněženku. *autoPRESS*. [Online] červen 2015. [Citace: 29. březen 2015.] <http://www.autopress.cz/?page=29.spravny-tlak-setri-nejen-penezenku>.
- [39] LUTRON ELECTRONIC ENTERPRISE CO., LTD. Force gauge, 100 Kg. *Lutron*. [Online] 2015. [Citace: 29. březen 2015.] http://www.lutron.com.tw/ugC_ShowroomItem_Detail.asp?hidKindID=1&hidTypeID=25&hidCatID=&hidShowID=909&hidPrdType=&txtSrhData=.

PŘÍLOHA č. 1

Měření valivého odporu lehkého elektromobilu

Teorie valivého odporu

Měření, které proběhlo 21. 3. 2015 v areálu ZČU Plzeň, je zaměřeno na určení hodnoty valivého odporu pneumatik u lehkého čtyřkolového elektromobilu. Valivý odpor způsobuje reakční síla F_r , jejíž působíště je předsunuto ve směru jízdy oproti radiální síle F_k o tzv. rameno valivého odporu e . Právě toto předsunutí, které závisí na mnoha vlivech (na obr. 1 např. demonstrován vliv nahuštění pneumatiky), je pasivním účinkem. Způsobuje tak moment k ose otáčení kola, který působí proti jeho rotaci. Čím větší bude rameno valivého odporu e , tím větší moment v závislosti na síle F_k bude působit. Síla F_k je závislá na zatížení pneumatiky:

$$F_k = m \cdot g$$

M je hmotnost, kterou je zatěžována pneumatika, g je gravitační zrychlení. Reakční síla F_R je rovna právě síle F_k a moment M , který působí proti rotaci kola, lze jednoduše vypočítat:

$$M = e \cdot F_R$$

Obvodová síla O_v , která působí proti pohybu kola, se vypočítá dle následující závislosti:

$$O_v = \frac{M}{r_d}$$

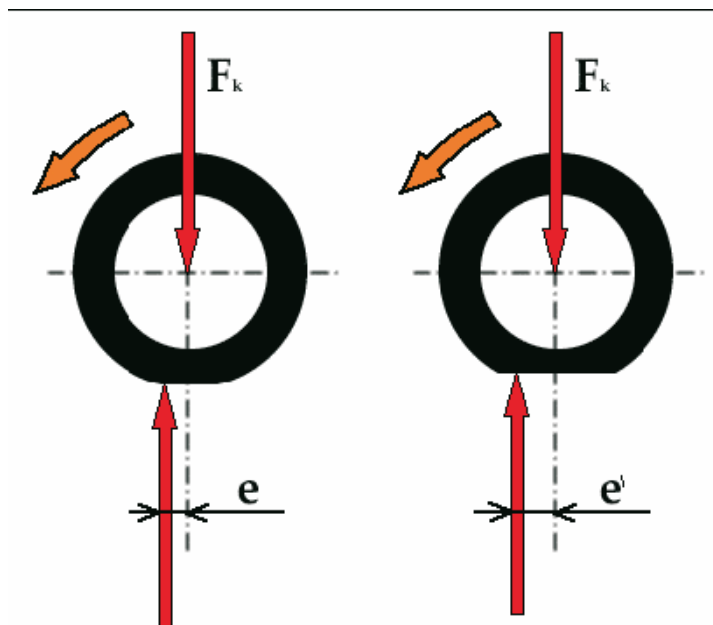
R_d je tzv. dynamický poloměr kola, který je menší, než skutečný poloměr, protože pneumatika je vozovkou deformována. Pro snazší výpočet je zaveden pojem součinitel valivého odporu f , jehož bezrozměrná hodnota odpovídá podílu ramena valivého odporu e a dynamického poloměru kola r_d . Valivý odpor O_v se pak spočítá takto:

$$O_v = f \cdot m \cdot g$$

Konkrétní hodnoty součinitele valivého odporu při daných podmínkách jsou uvedeny v mnoha tabulkách.

Měření

Experimentální určení valivého odporu proběhlo ve třech měřeních, jejichž podstatou bylo určit pomocí siloměru odpor proti pohybu. Experiment probíhal při ideálních podmínkách v uzavřené budově na téměř vodorovné ploše. Povrchem byla hladká betonová podlaha. Aplikovaným měřidlem byl digitální siloměr LUTRON FG-5100, který umožňuje měření tažné i tlačné síly do hodnoty 1 kN, což odpovídá tíze 100 kg. Jeho přesnost při 23 °C je stanovena na 0,5 %. Skládá se z vyhodnocovacího přístroje se zobrazovací jednotkou a softwarem umožňujícím různé funkce a samostatného tenzometru. Oko tenzometru se při měření valivého odporu jednoduše spojí s konstrukcí elektromobilu – např. tažným lanem. Pro elektromobil s hmotností 450 kg postačí tažení lidskou silou. Síla, která je potřebná k plynulému pohybu elektromobilu minimální konstantní rychlostí, je rovna přibližně valivému odporu kol O_v při zanedbání ztrát v uložení kol.



Obrázek 37 Valivý odpor pneumatik [38]



Obrázek 38 FG-5100 [39]

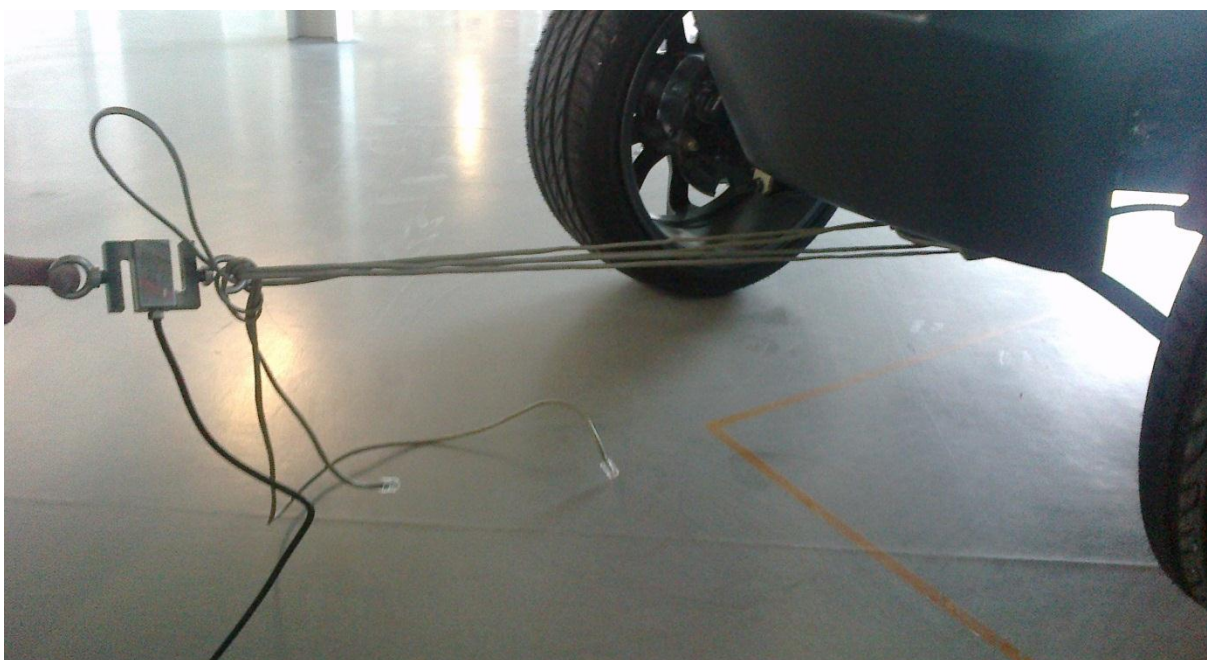
Následující fotodokumentace ilustruje průběh měření:



Obrázek 39 Uspořádání měřících prvků



Obrázek 40 Kolo elektromobilu



Obrázek 41 Měření

Tabulka naměřených hodnot

| Pořadí měření | Max. naměřená síla [N] |
|---------------|------------------------|
| 1. | 62 |
| 2. | 68 |
| 3. | 125 |
| 4. | 65 |
| 5. | 122 |

Tabulka 21 Naměřené hodnoty

Z tabulky lze vyčíst přibližně dvě rozdílné hodnoty měření – 65 N, 124 N. Bližším přezkoumáním bylo zjištěno, že teoretická hodnota valivého odporu 124 N je navýšena o přibrzdování kotoučovými brzdami, které se při minimálních rychlostech tažení ($\approx 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) projevilo. Jako platnou hodnotu lze uvažovat přibližně 65 N. To odpovídá na jedno kolo hodnotě 16,25 N.

Kontrolní výpočet

Vozidlo bylo vybaveno pneumatikami SYRON 205/40 ZR 17 XL 84W na hliníkových ráfcích, které byly v době měření nahuštěny na předepsaný tlak. Tyto pneumatiky jsou zařazeny do skupiny valivého odporu E dle energetického štítku EU. Uvedená skupina se však vztahuje přímo ke spotřebě paliva, energetický štítek nedává informaci o konkrétním součiniteli valivého odporu, tedy pro kontrolní výpočet lze brát v úvahu běžně užívanou hodnotu pneumatika-asfalt $f = 0,01$. Dle vyjádřených závislostí v teoretické části této práce lze valivý odpor vypočítat:

$$O_v = 0,01 \cdot 112,5 \cdot 10 = 11,25 \text{ N}$$

Vypočtená hodnota je o 5 N nižší, než naměřená. To je dáno zanedbáním ztrát v uložení kol při odečítání výsledků měření a určitou nepřesností ve volbě součinitele valivého odporu.

Závěr

Celkově lze označit měření za úspěšné, při téměř ideálních podmínkách byla naměřena hodnota, která je, jak bylo předpokládáno, mírně vyšší, než hodnota vypočtená.

PŘÍLOHA č. 2

Optimalizace přenosových částí koncepcí č. 2 a 3

Koncepce č. 2

Vzhledem k relativně vysokému vypočtenému točivému momentu $M_H = 442,2 \text{ N} \cdot \text{m}$, který byl získán na základě předpokladu jednostupňové převodovky u koncepcie č. 2, je třeba z důvodu velkého rozsahu rychlostí ($0 - 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) koncipovat převodové ústrojí s měnitelným převodem. Existuje několik základních variant pro osobní automobily:

- *vícestupňová převodovka* – s neměnnými, pevnými převody (zpravidla 3 – 7)
 - *manuální* – konkrétní převod volí řidič, změnu taktéž fyzicky provádí
 - *poloautomatická (nebo také robotická)* – konkrétní převod volí řidič, změnu převodu provádí po řidičově volbě fyzicky ústrojí převodovky
 - *plně automatická* (často s poloautomatickým režimem) – o změně převodu rozhoduje řídicí jednotka, fyzicky pak probíhá přeřazení stejně jako u poloautomatické převodovky
- *variátor* – s plynule proměnným převodem, změna převodu probíhá automaticky, převod se při zrychlování mění postupně od nejnižšího po nejvyšší a naopak, nepřetržitě

Vzhledem k technické jednoduchosti a výdrži je lépe volit vícestupňovou převodovku. Jedná se o osvědčené řešení, které má v porovnání s variátorem vyšší účinnost a větší trvanlivost. K tomuto typu je nutno připojit spojku, která bude umístěna mezi výstupní hřídelí elektromotoru a převodovkou. Na základě požadavku zákazníka bude možno volit konkrétní typ vícestupňové převodovky – u této třídy vozidla nejčastěji automatickou. Následující výpočet se zakládá na výpočtu požadovaného točivého momentu motoru a výkonu z hlediska času zrychlení ze str. 45 – 47. Modifikace bude spočívat návrhově v použití základní třístupňové převodovky, která by měla potřebný točivý moment motoru pro dosažení daného času zrychlení snížit. Vstupní hodnoty zůstanou stejné, jen převodové poměry i_c budou nyní tři pro zvolené intervaly rychlostí:

| Interval rychlostí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] | 0 – 14 | 14 – 30 | 30 – 44,4 (max) |
|---|--------|---------|-----------------|
| Převodový poměr i_{cn} [-] | ? | ? | ? |

Tabulka 22 Intervaly rychlosti pro výpočet převodových poměrů

Převodové poměry i_{cn} z maximální úhlové rychlosti hřídele motoru:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \cong 630 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odpovídající obvodová rychlost kola:

$$v_{o2} = \omega \cdot \frac{d}{2} = 630 \cdot 0,35 \cong 220,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navrhované celkové převodové poměry:

$$i_{c1} = \frac{v_{o2}}{v_{o1}} = \frac{220,5}{14} \cong 15,75$$

$$i_{c2} = \frac{v_{o2}}{v_{o2}} = \frac{220,5}{30} \cong 7,35$$

$$i_{c3} = i_c = \frac{v_{o2}}{v_o} = \frac{220,5}{44,4} \cong 5$$

| | | | |
|---|--------|---------|-----------------|
| Interval rychlostí [m . s ⁻¹] | 0 – 14 | 14 – 30 | 30 – 44,4 (max) |
| Převodový poměr i_{cn} [-] | 15,75 | 7,35 | 5 |

Tabulka 23 Převodové poměry pro dané intervaly rychlostí

Výpočet bude probíhat s pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel, kde pro konkrétní hodnotu točivého momentu bude zjištěn čas zrychlení. Na základě tohoto času bude točivý moment M_H optimalizován tak, aby bylo zajištěno zrychlení z 0 – 100 km . h⁻¹ přibližně za 10 s.

Jako výchozí hodnota je zvoleno např. $M_H = 200$ N . m. Tažná síla na kolech F_{K1} pro tuto hodnotu bude v prvním intervalu (0 – 14 m . s⁻¹):

$$F_{K1} = \frac{M_H \cdot i_{c1} \cdot \eta_c}{\frac{d}{2}} = \frac{200 \cdot 15,75 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 8550 \text{ N}$$

Analogicky F_{K2} pro tuto hodnotu bude v druhém intervalu (14 – 30 m . s⁻¹):

$$F_{K2} = \frac{M_H \cdot i_{c2} \cdot \eta_c}{\frac{d}{2}} = \frac{200 \cdot 7,35 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 4000 \text{ N}$$

Tabulka 14 bude po této modifikaci vypadat takto (v [m . s⁻¹], F_K [N], O [N], a [m . s⁻²], dt [s]):

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 8550 | 8550 | 8550 | 8550 | 8550 | 8550 | 8550 | 8550 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| O | 288,60 | 290,08 | 294,52 | 301,92 | 312,28 | 325,60 | 341,88 | 361,12 | 383,32 | 408,48 | 436,60 | 467,68 | 501,72 | 538,72 | 574,14 |
| a | 3,886 | 3,886 | 3,884 | 3,880 | 3,876 | 3,870 | 3,862 | 3,853 | 1,775 | 1,764 | 1,751 | 1,737 | 1,721 | 1,704 | 1,688 |
| dt | 0,000 | 0,515 | 0,515 | 0,515 | 0,516 | 0,517 | 0,518 | 0,519 | 1,127 | 1,134 | 1,142 | 1,152 | 1,162 | 1,173 | 1,054 |

Tabulka 24 Tabulka vypočtených hodnot při působení točivého momentu 200 N . m

Součet přírůstků časů dt činí 11,6 s. Je třeba zvýšit točivý moment M_H , aby součet byl blíže 10 s. Opravná hodnota bude $M_H = 225$ N . m.

Tažná síla na kolech F_{K1} :

$$F_{K1} = \frac{225 \cdot 15,75 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 9620 \text{ N}$$

Analogicky F_{K2} :

$$F_{K2} = \frac{380 \cdot 7,35 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 4488 \text{ N}$$

Tabulka 14 pro zvýšený točivý moment na $M_H = 225 \text{ N} \cdot \text{m}$:

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 9620 | 9620 | 9620 | 9620 | 9620 | 9620 | 9620 | 9620 | 4488 | 4488 | 4488 | 4488 | 4488 | 4488 | 4488 |
| O | 288,60 | 290,08 | 294,52 | 301,92 | 312,28 | 325,60 | 341,88 | 361,12 | 383,32 | 408,48 | 436,60 | 467,68 | 501,72 | 538,72 | 574,14 |
| a | 4,373 | 4,372 | 4,370 | 4,367 | 4,362 | 4,356 | 4,349 | 4,340 | 1,997 | 1,986 | 1,973 | 1,959 | 1,943 | 1,926 | 1,910 |
| dt | 0,000 | 0,457 | 0,458 | 0,458 | 0,459 | 0,459 | 0,460 | 0,461 | 1,002 | 1,007 | 1,014 | 1,021 | 1,029 | 1,038 | 0,932 |

Tabulka 25 Tabulka vypočtených hodnot pro točivý moment 225 N . m

S tímto točivým momentem je schopen elektromobil zrychlit za $t = 10,3 \text{ s}$.

Po modifikaci převodového ústrojí je schopen tento elektromobil s pohonnou jednotkou o točivém momentu $M_H = 225 \text{ N} \cdot \text{m}$ zrychlit za stejný čas jako při původním uvažování jednostupňové převodovky a točivém momentu $M_H = 442,2 \text{ N} \cdot \text{m}$. Optimalizace byla tedy úspěšná.

Koncepce č. 3

U této koncepce dodávkového elektromobilu přichází v úvahu pouze použití vícešupňové převodovky. Životnost variátoru by byla vzhledem k vyššímu zatížení velmi omezená. Analogicky ke koncepci č. 2 bude přepočten potřebný točivý moment motoru při použití tříšupňové převodovky a zachování projektovaných hodnot. Mezi výstupní hřídelí motoru a převodovkou přibude spojka. Zákazník bude moci volit opět mezi manuální variantu nebo určitým stupněm automatizace řazení. Následující výpočet se zakládá taktéž na výpočtu požadovaného točivého momentu motoru a výkonu z hlediska času zrychlení ze str. 52 – 54. Zvolené intervaly rychlostí:

| Interval rychlostí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] | 0 – 8,4 | 8,4 – 19,5 | 19,5 – 33,3 (max) |
|---|---------|------------|-------------------|
| Převodový poměr i_{cn} [-] | ? | ? | ? |

Tabulka 26 Intervaly rychlosti pro výpočet převodových poměrů

Převodové poměry i_{cn} z maximální úhlové rychlosti hřídele motoru:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \cong 630 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odpovídající obvodová rychlost kola:

$$v_{o2} = \omega \cdot \frac{d}{2} = 366,5 \cdot 0,35 \cong 220,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Navrhované celkové převodové poměry:

$$i_{c1} = \frac{v_{o2}}{v_{o1}} = \frac{220,5}{8,4} \cong 26,25$$

$$i_{c2} = \frac{v_{o2}}{v_{o2}} = \frac{220,5}{19,5} \cong 11,3$$

$$i_{c3} = i_c = \frac{v_{o2}}{v_o} = \frac{220,5}{33,3} \cong 6,6$$

| Interval rychlostí [m . s ⁻¹] | 0 – 8,4 | 8,4 – 19,5 | 19,5 – 33,3 (max) |
|---|---------|------------|-------------------|
| Převodový poměr i_{cn} [-] | 26,25 | 11,3 | 6,6 |

Tabulka 27 Převodové poměry pro dané intervaly rychlostí

Jako výchozí hodnota pro výpočet bude zvoleno opět $M_H = 200$ N . m. Tažná síla na kolech F_{K1} pro tuto hodnotu bude v prvním intervalu (0 – 8,4 m . s⁻¹):

$$F_{K1} = \frac{M_H \cdot i_{c1} \cdot \eta_c}{\frac{d}{2}} = \frac{200 \cdot 26,25 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 14250 \text{ N}$$

Analogicky F_{K2} pro tuto hodnotu bude v druhém intervalu (8,4 – 19,5 m . s⁻¹):

$$F_{K2} = \frac{M_H \cdot i_{c2} \cdot \eta_c}{\frac{d}{2}} = \frac{200 \cdot 11,3 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 6134 \text{ N}$$

Stejně tak F_{K3} ve třetím intervalu (19,5 – 33,3 m . s⁻¹):

$$F_{K3} = \frac{M_H \cdot i_{c3} \cdot \eta_c}{\frac{d}{2}} = \frac{200 \cdot 6,6 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 3580 \text{ N}$$

Tabulka 19 bude nyní vypadat takto (v [m . s⁻¹], F_K [N], O [N], a [m . s⁻²], dt [s]):

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 14250 | 14250 | 14250 | 14250 | 14250 | 6134 | 6134 | 6134 | 6134 | 6134 | 3580 | 3580 | 3580 | 3580 | 3580 |
| O | 433,00 | 439,48 | 458,92 | 491,32 | 536,68 | 595,00 | 666,28 | 750,52 | 847,72 | 957,88 | 1081,0 | 1217,1 | 1366,1 | 1528,1 | 1683,2 |
| a | 4,187 | 4,185 | 4,179 | 4,169 | 4,156 | 1,678 | 1,657 | 1,631 | 1,602 | 1,569 | 0,757 | 0,716 | 0,671 | 0,622 | 0,575 |
| dt | 0,000 | 0,478 | 0,479 | 0,480 | 0,481 | 1,192 | 1,207 | 1,226 | 1,249 | 1,275 | 2,641 | 2,793 | 2,981 | 3,217 | 3,097 |

Tabulka 28 Tabulka vypočtených hodnot při působení točivého momentu 200 N . m

Součet přírůstků časů dt činí 22,8 s, což je o přibližně 3 s méně, než s původní jednostupňovou převodovkou. Je možné točivý moment M_H požadovat ještě nižší, aby součet byl blíže 25 s. Opravná hodnota bude $M_H = 190$ N . m.

Tažná síla na kolech F_{K1} :

$$F_{K1} = \frac{190 \cdot 26,25 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 13537 \text{ N}$$

F_{K2} :

$$F_{K2} = \frac{190 \cdot 11,3 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 5827\text{N}$$

Stejně tak F_{K3} :

$$F_{K3} = \frac{190 \cdot 6,6 \cdot 0,95}{\frac{0,7}{2}} \cong 3403\text{N}$$

Tabulka 19 pro točivý moment na $M_H = 190 \text{ N} \cdot \text{m}$:

| v | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 27,78 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| F_K | 13537 | 13537 | 13537 | 13537 | 13537 | 5827 | 5827 | 5827 | 5827 | 5827 | 3403 | 3403 | 3403 | 3403 | 3403 |
| O | 433,00 | 439,48 | 458,92 | 491,32 | 536,68 | 595,00 | 666,28 | 750,52 | 847,72 | 957,88 | 1081,0 | 1217,1 | 1366,1 | 1528,1 | 1683,2 |
| a | 3,971 | 3,969 | 3,963 | 3,953 | 3,939 | 1,585 | 1,564 | 1,538 | 1,509 | 1,475 | 0,704 | 0,662 | 0,617 | 0,568 | 0,521 |
| dt | 0,000 | 0,504 | 0,505 | 0,506 | 0,508 | 1,261 | 1,279 | 1,300 | 1,325 | 1,355 | 2,842 | 3,019 | 3,240 | 3,520 | 3,416 |

Tabulka 29 Tabulka vypočtených hodnot pro točivý moment 190 N . m

S tímto točivým momentem je schopen elektromobil zrychlit přibližně za $t = 25 \text{ s}$, což odpovídá požadované hodnotě, výsledný potřebný točivý moment je však oproti 252 N . m pouze 190 N . m.

Shrnutí

Modifikace převodových ústrojí koncepcí č. 2 a 3 prokázala po ověřovacích výpočtech svoji opodstatněnost. Navzdory většímu množství potřebných částí pohonné soustavy a větší technické a ekonomické náročnosti systému je z hlediska provozu nezbytně nutné, aby byl točivý moment elektromotoru dobře zpřevodován, zvláště pokud elektromobil dosahuje poněkud vyšších rychlostí nebo pracuje s vyšší hmotností – např. nákladem. Ještě lepších výsledků by bylo dosaženo, pokud by byl uvažován větší počet převodových stupňů, pro potřeby této práce však není třeba tyto varianty dále analyzovat.