

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

František Bošek

Návrh pohonu malého elektrického městského vozidla
pro carsharing v Praze

Bakalářská práce

Praha 2020



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

František Bošek

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Návrh pohonu malého elektrického městského vozidla pro carsharing v Praze**

Název tématu (anglicky): Design of a powertrain for a small electric vehicle for carsharing in Prague

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Důvody pro elektromobily a carsharing obecně
- Současné elektromobily, jejich architektura a hlavní komponenty
- Průzkum trhu a dostupnosti hlavních komponentů pro pohon elektromobilů
- Návrh a sestavení pohonu elektromobilu na základě dostupných komponentů
- Vytvoření simulací pro dostupné varianty pohonu pomocí simulačního software
- Představení dostupných architektur pohonu s hlavními charakteristikami a cenovými relacemi, výběr nejlepší varianty pro studentský carsharing v Praze



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího BP

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: 1. James Larminie, John Lowry, Electric Vehicle Technology Explained
3. Amir Khajepour, Saber Fallah, Avesta Goodarzi ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES
2. Stone, Richard K. Ball, Jeffrey - Automotive Engineering Fundamentals

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dmitry Rozhdestvenskiy**

Datum zadání bakalářské práce: **26. června 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

František Bošek
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....26. června 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této bakalářské práce. Zvláště pak děkuji Ing. Dmitriji Rozhdestvenskimu, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za cenné rady, které mi poskytl. Na závěr bych rád poděkoval mé rodině za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu mého studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském. O právech souvisejících s právem autorským a o změně zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis autora

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

NÁVRH POHONU MALÉHO ELEKTRICKÉHO MĚSTSKÉHO VOZIDLA PRO CARSHARING V PRAZE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Srpen 2020

František Bošek

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je návrh pohonu malého městského elektrického vozidla, které bude využíváno pro studentský carsharing v Praze. Návrh pohonu je založen na analýze aktuálních malých elektromobilů a na průzkumu trhu dostupných komponentů pro elektrický pohon. Nejvhodnější kombinace vybraných komponentů je určena na základě simulací provedených v programu IGNITE.

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is the design of a powertrain for a small urban electric vehicle, which will be used for student carsharing in Prague. The design is based on the analysis of current small electric cars and on the market research of available components for electric drive. The most suitable combination of selected components is determined on the basis of simulation performed in the IGNITE software.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromobil, carsharing, pohon, baterie, elektromotor, modelování, simulace

KEY WORDS

Elektromobile, carsharing, powertrain, batteries, electric motor, modeling, simulation

Obsah

Seznam použitých zkratek	9
1 Úvod	10
2 Popis elektricky poháněných vozidel a jeho pohonu	11
2.1 Zdůvodnění	11
2.1.1 Proč elektromobil	11
2.1.2 Carsharing	11
2.2 Úvod do elektrických vozidel.....	12
2.2.1 Typy elektrických vozidel	12
2.2.2 Architektura pohonu elektromobilu.....	14
2.3 Baterie elektromobilu.....	14
2.3.1 Parametry baterií	14
2.3.1.1 Kapacita	15
2.3.1.2 Zásoba (množství) energie	15
2.3.1.3 Měrná energie	15
2.3.1.4 Hustota energie	15
2.3.1.5 Měrný výkon	15
2.3.1.6 Geometrie baterie.....	15
2.3.1.7 Teplota baterie.....	16
2.3.1.8 Životnost baterie a počet cyklů	16
2.3.2 Typy baterií.....	16
2.3.2.1 Olověné baterie	16
2.3.2.2 Nikl-metal hydridové baterie	17
2.3.2.3 Lithium-ion baterie	18
2.3.2.4 Ostatní baterie	19
2.3.2.5 Shrnutí.....	20
2.4 Elektromotor	21
2.4.1 Bezkomutátorový stejnosměrný motor	21
2.4.2 Synchronní motor s permanentními magnety.....	22
2.4.3 Třífázový asynchronní motor	23
2.4.4 Spínaný reluktanční motor	24
2.4.5 Shrnutí.....	25
2.5 Legislativa související s elektromobily.....	25
2.5.1 EHK/OSN č. 85.....	25
2.5.1.1 Netto výkon	25
2.5.1.2 Maximální 30minutový výkon.....	26
2.5.2 EHK/OSN č. 100.....	26

2.5.2.1	Ochrana před úrazem elektrickým proudem	26
2.5.2.2	Dobíjecí systém pro uchování energie (REESS).....	26
2.5.2.3	Funkční bezpečnost.....	26
2.5.2.4	Stanovení emisí vodíku	27
2.5.3	EHK/OSN č. 101.....	27
2.5.3.1	Spotřeba elektrické energie	27
2.5.3.2	Akční dosah na elektřinu	27
2.5.4	Nařízení komise EU 2017/1151	27
2.5.4.1	Porovnání jízdních cyklů NEDC a WLTP	28
3	Průzkum trhu malých městských elektrických vozidel	30
3.1	Návrh.....	31
3.1.1	Rozměry, hmotnost a těžiště vozidla	31
3.1.2	Elektromotor	32
3.1.2.1	Motenergy ME1003	33
3.1.2.2	Iskra	33
3.1.2.3	HPEVS AC	33
3.1.2.4	Motenergy ME1302	34
3.1.3	Baterie.....	34
3.1.3.1	Určení počtu článků baterie.....	35
4	Návrh modelu v programu IGNITE.....	38
4.1	Popis programu IGNITE.....	38
4.2	Popis modelu.....	39
4.2.1	Jízdní cyklus.....	40
4.2.2	CycleDriver	40
4.2.3	EV kontroler.....	40
4.2.4	Pneumatiky.....	41
4.2.5	Baterie.....	41
4.2.6	Elektromotor	42
4.2.7	Vozidlo.....	42
4.3	Simulace.....	42
5	Výsledky simulace	44
5.1	Popis programu R – Post.....	44
5.2	Dojezd vozidla	44
5.3	Rozjezd vozidla	45
5.4	Vyhodnocení.....	47
6	Závěr	49
	Seznam použitých zdrojů.....	51

Seznam obrázků.....	54
Seznam tabulek.....	55

Seznam použitých zkratk

AC – Alternating current

DC – Direct current

NEDC – New European Driving Cycle

PM – permanentní magnety

REESS – Rechargeable Energy Storage Systems

WLTC – Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles

WLTP – Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure

1 Úvod

Toto téma jsem si zvolil z několika důvodů. Hlavní motivací k výběru byla skutečnost, že elektromobilita se stává stále více populární a mluví se o ni jako o budoucnosti automobilové dopravy. Dalším důvodem je můj zájem o ochranu životního prostředí. Není mi totiž lhostejné to, v jakém prostředí žiji, a v jakém prostředí budou žít příští generace. Tato práce je tedy jedním z mých příspěvků ke zlepšení tohoto prostředí.

Hlavním cílem práce je navrhnout pohon malého městského vozidla vhodného pro provoz ve městě. Navrhované vozidlo by mělo sloužit studentům pro přejezdy mezi jednotlivými budovami fakulty dopravní, takže se v podstatě jedná o studentský carsharing. Pohon tohoto vozidla budu navrhovat na základě analýzy současného trhu malých městských vozidel. Přitom ale beru ohledy na dostupnost a cenu jednotlivých komponent. K návrhu budu využívat simulací v programu IGNITE od společnosti Ricardo. Poté na základě těchto simulací vyberu nejvhodnější kombinaci komponentů. Práce je rozdělena na 4 části.

V 1. části se budu zabývat elektromobilem obecně. Vysvětlím, proč je elektromobil lepší pro životní prostředí než konvenční automobil se spalovacím motorem, a proč je carsharing přínosem pro uživatele a pro město. Také zde uvedu rozdělení elektricky poháněných vozidel. Dále popíšu architekturu pohonu elektromobilu a základní komponenty, které tento pohon tvoří. Uvedu také různé porovnání jednotlivých komponentů.

Ve 2. části provedu průzkum trhu současných malých elektrických vozidel vhodných do města. Popíšu jejich parametry a komponenty. Na základě toho budu vybírat základní komponenty pro můj návrh pohonu. Pro každou součást pohonu bude vybráno několik různých dostupných komponentů od různých výrobců. Také budou popsány jejich parametry a ceny.

Ve 3. části budu tvořit model navrhovaného pohonu v simulačním programu IGNITE. Popíšu jednotlivé prvky, ze kterých se model bude skládat. Dále nadefinuji parametry těchto prvků. Poté budou provedeny simulace, abych zjistil maximální dojezd vozidla na jedno nabití a maximální rychlost. Simulace budou provedeny pro všechny možné kombinace vybraných komponentů.

Ve 4. části popíšu výsledky simulace. Výsledky budou interpretovány ve formě matic a grafů. Zhodnotím tyto výsledky a vyberu nejvhodnější variantu vybraných komponentů. Dále zde uvedu, jak by bylo možné navrhovaný pohon upravit tak, aby se zvýšil dojezd vozidla nebo maximální rychlost.

2 Popis elektricky poháněných vozidel a jejich pohonu

Moje bakalářská práce se zabývá návrhem pohonu elektromobilu, proto je důležité pochopit fungování základních komponentů pohonu elektromobilu. Součástí dané kapitoly bude popis principu funkce elektromobilu a jeho komponentů.

2.1 Zdůvodnění

V této kapitole bude vysvětleno, jaké jsou hlavní důvody pro koupi elektromobilu, a proč může být elektrický pohon výhodnější než klasický konvenční. Dále zde bude probráno, v čem může být carsharing přínosem.

2.1.1 Proč elektromobil

V dnešní době, kdy se klade velký důraz na ochranu životního prostředí, může být právě elektromobilita řešením tohoto problému. V porovnání s automobily se spalovacími motory nabízí elektromobil řadu výhod. Hlavním důvodem pro elektromobilitu v oblasti ochrany životního prostředí jsou celkové emise.

Elektromobil má sice vyšší emisní náročnost na výrobu, ale v průběhu životního cyklu je emisní profil elektromobilu výhodnější než u klasického automobilu se spalovacím motorem. Emisní náročnost výroby je způsobena především neekologickou výrobou baterií. Nicméně po ujetí 100 až 200 km začíná být elektromobil výhodnější než automobil na naftu [1]. Dále zde také hraje roli fakt, že automobil na benzín či naftu vytváří znečištění během jízdních hodin ve městech a na ostatních silnicích. Zatímco emise při dobíjení elektromobilu se vyskytují v elektrárnách ve vzdálenějších lokalitách. Navíc v současné době se budují obnovitelné zdroje, to znamená, že energetický mix bude postupem času nízkoemisní, což dále sníží emise elektromobilu.

Ze studie ministerstva energetiky USA [2], která se zabývá energetickou účinností vyplývá, že výhodnost elektromobilu spočívá právě v účinnosti motoru. U spalovacích motorů účinnost dosahuje 25 % až 35 %. Tato nízká účinnost je dána tím, že se jedná o tepelné stroje. Elektromotor nabízí o dost větší účinnost, a to 85 % až 95 %. Celková účinnost pohonu elektromobilu je 77 % až 82 %. Z toho zhruba 17 % je tvořeno rekuperací, což je další velkou výhodou elektrických vozů.

2.1.2 Carsharing

Carsharing, neboli sdílení aut více lidmi, se začal v České republice rozvíjet teprve v posledních letech. Nejvíce společností nabízející carsharing najdeme v Praze. Sdílení automobilů sdružuje výhody individuální a hromadné dopravy. Oproti využívání vlastního vozidla mohou uživatelé snížit investiční a provozní náklady a starosti spojené s vlastněním osobního automobilu. Sdílení automobilů snižuje například nároky na parkovací plochy

ve městech. Obecně je možné říct, že carsharing snižuje negativní dopady automobilů na životní prostředí.

Příkladem města s funkčním carsharingem je například Madrid, kde službu zprostředkovává společnost ZITY. Carsharing funguje pomocí bezplatné aplikace, ve které si uživatel během minuty může pronajmout jedno z nabízených vozidel. Celkem tato společnost nabízí 658 elektromobilů Renault Zoe [3]. Využití elektromobilů pro carsharing je vhodné především z environmentálních důvodů, protože se tím snižuje tvorba lokálních emisí.

V této práci navrhované malé elektrické vozidlo je určeno pro carsharing v Praze. Vozidlo by mělo sloužit především studentům, kteří přejíždí mezi budovami fakulty dopravní.

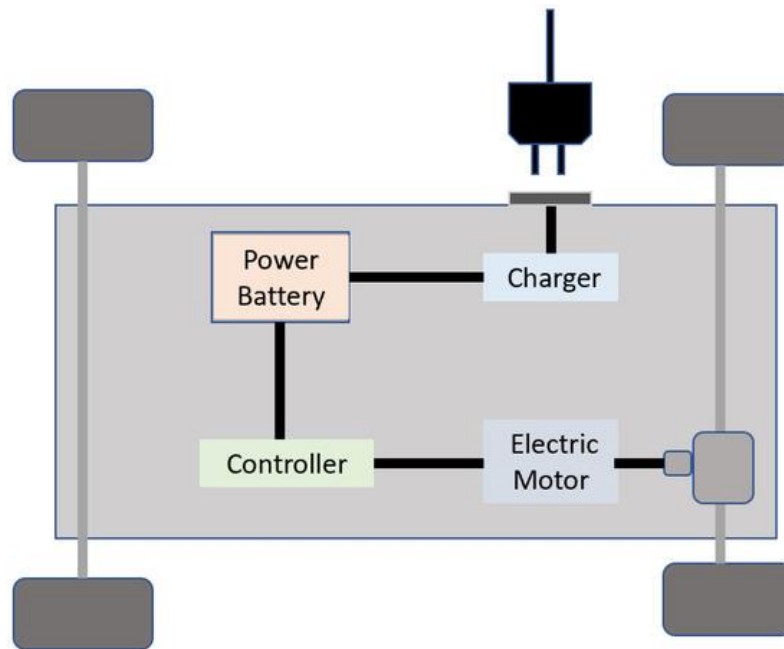
2.2 Úvod do elektrických vozidel

První elektromobily vznikaly již v roce 1835 [4]. V České republice první elektrický vůz postavil František Křižík roku 1895 [4]. V té době již byly běžné, například ve Vídni, elektricky poháněné kočáry. Elektromobil se těšil velké popularitě také v USA na začátku 20. století. Na tehdejších vozovkách bylo pravděpodobnější setkání s elektricky poháněným vozidlem než s automobilem se spalovacím motorem. Velkým a rozhodujícím milníkem byl vznik Fordu modelu T, jehož sériová výroba rozhodla ve prospěch automobilů se spalovacím motorem.

2.2.1 Typy elektrických vozidel

Lze konstatovat, že většina současných elektricky poháněných automobilů jsou typu elektromobil s baterií. Koncepte elektrického vozidla s baterií je jednoduchá. Základní komponenty vozidla jsou baterie, elektrický motor a kontrolér (řídící systém). Baterie slouží k uskladňování elektrické energie. Obvykle se nabíjí ze sítě pomocí dobíjecí jednotky, která může být umístěna na palubě vozu, nebo v nabíjecí stanici. Kontrolér elektromobilu, slouží k monitorování dodávané energie do motoru, čímž přímo ovlivňuje rychlost vozidla vpřed i vzad.

Na trhu je v současné době spousta vozidel tohoto typu. Od těch nejmenších jako jsou elektrická kola a další malá elektrická vozidla až po sériově vyráběné automobily. Příkladem může být Nissan Leaf či česká Škoda Citygo apod.



Obrázek 1 – Základní schéma elektromobilu s baterií [5]

V menším počtu lze na trhu nalézt elektromobily využívající palivové články. Princip fungování elektromobilu s palivovými články je v podstatě stejný jako u elektromobilu na baterii. Rozdíl je v tom, že dobíjecí baterie je zde nahrazena palivovými články nebo tzv. metal – air baterií (kov – vzduchová baterie). Největšími představiteli těchto vozů jsou japonské automobilky, například automobil Honda FCX Clarity nebo Toyota Mirai.

Speciálními typy elektromobilů jsou vozidla poháněná solární energií. Tyto vozy využívají fotovoltaické články, které jsou umístěny na střeše vozidla. Fotovoltaické články přeměňují solární energii na elektrickou. Automobil tedy nepotřebuje externí zdroj energie. Od vývoje vozidel poháněných solární energií se v současné době upustilo. Solární panely zatím nejsou účinné tak, aby stačili na aktuální požadavky na pohon. [8]. Dají se však využít u klasického elektromobilu s baterií, kde poté dokážou zvýšit dojezd automobilu. Plně solárně poháněný elektromobil, který by byl konkurenceschopný, je spíše otázkou do budoucna.

Samozřejmě typů elektricky poháněných vozidel je více. Mohou to být trolejbusy a tramvaje využívající trakční vedení, nebo vozidla používající lineární motor, což jsou vlaky Maglev. V kapitole je nezmiňuji, protože tato práce se věnuje automobilům. Navrhovaný elektromobil bude typ elektromobil s baterií, proto se dále budu věnovat pouze tomuto typu.

2.2.2 Architektura pohonu elektromobilu

Důležitými částmi pohonu elektromobilu jsou akumulátor, elektromotor, měniče a řídicí systémy (kontroléry apod.). Dále převodovka, která u elektromobilů bývá nejčastěji jednostupňová. Nelze opomenout ani diferenciál, který rozděluje poměr otáček na kola.

Existují dvě základní koncepce uspořádání pohonu elektromobilu. Vychází z použitého typu a umístění motoru. Elektromotor může být 1 centrální, nebo může být umístěn v kole [6]. Při umístění v kole se používají buď 2, nebo 4 elektromotory [6]. Výhodou tohoto umístění motoru je, že není zapotřebí hnací hřídel ani diferenciál. To má za následek větší efektivitu pohonu. Nevýhodou je složitější řízení, protože motory musí běžet synchronně. Další nevýhodou může být omezený prostor v kole, motor se totiž umísťuje mezi ráfek a brzdy.

Umístění motoru v kole není novinkou. S tímto nápadem přišel již Ferdinand Porsche [7]. Nicméně na současném trhu nenajdeme žádný elektromobil s touto koncepcí, který by byl sériově vyráběn. Elektromobily s tímto typem pohonu se vyrábí jen jako koncepty, popřípadě se jedná o přestavby sériově vyráběných automobilů.

Důležitou součástí pohonu elektromobilu jsou měniče (anglicky inverter). Tyto součástky slouží ke změně parametrů elektrické energie. Některé elektromotory vyžadují ke své činnosti střídavý proud. Baterie ale poskytuje proud stejnosměrný. Inverter je zařízení, které dokáže změnit stejnosměrný elektrický proud na proud střídavý.

2.3 Baterie elektromobilu

Baterie je u elektricky poháněných automobilů jeden z klíčových komponentů. V klasických elektromobilech baterie slouží k uskladnění energie. Zároveň bývá prvkem pohonu elektromobilu s nejvyšší cenou, největší vahou a největším objemem. Porozumění problematice baterií je tedy základní pro vývoj pohonu elektromobilu.

Baterie se skládá z propojených článků. Úkolem baterie je přeměnit chemickou energii na energii elektrickou. Bateriové články jsou tvořeny zápornou a kladnou elektrodou, jejichž okolní prostor je zaplněn elektrolytem. Mezi těmito částmi probíhá chemická reakce, která generuje jednosměrný elektrický proud (DC). Při dobíjení baterie tato reakce probíhá zpětně a baterie se vrátí do nabitého stavu.

2.3.1 Parametry baterií

U baterií lze sledovat několik parametrů. Zde jsou uvedeny parametry, které jsou důležité pro návrh elektricky poháněného vozidla.

2.3.1.1 Kapacita

Kapacita je jedním z nejdůležitějších parametrů baterie. Pokud hovoříme o kapacitě baterie, obvykle udáváme Ah (ampérhodiny) [8]. Tato jednotka je odvozena od jednotky SI coulomb. Jedna Ah je rovna 3600 C [8]. Jako příklad lze uvést, že baterie má 10 Ah. Teoreticky to znamená, že může poskytnout 1 A po dobu 10 hodin nebo 2 A po dobu 5 hodin, anebo 10 A po dobu 1 h. V praxi to ovšem nefunguje tak ideálně. Pokud baterie bude poskytovat 1 A po dobu 10 hodin, tak 10 A se vždy vyčerpá v kratším čase než 10 h.

2.3.1.2 Zásoba (množství) energie

Účelem baterie je skladování energie. Tento parametr závisí na kapacitě a na napětí baterie. Základní jednotkou SI je joule (J). Ale tato jednotka není vhodná, protože je příliš malá [8]. Místo toho se používá watthodina (Wh). Tato jednotka nám udává, jakou maximální energii může baterie poskytnout po dobu 1 hodiny [8]. Energie ve watthodinách získáme vynásobením kapacity v Ah s napětím ve V [8].

2.3.1.3 Měrná energie

Měrná energie je množství energie vztažené na 1 kilogram váhy baterie. Jednotkou měrné energie je $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Pokud známe měrnou energii a množství energie, můžeme určit, jaká bude váha baterie.

2.3.1.4 Hustota energie

Tento parametr je důležitý při určování požadovaných rozměrů baterie. Jednotkou tohoto ukazatele je $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ [8]. Potřebný rozměr baterie lze tedy určit tak, že vydělíme energii baterie (Wh) hustotou energie ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$). Tento vztah se dá využít i na výpočet energie, když jsou rozměry baterie známé. Rozměr baterie má vliv na celou konstrukci elektromobilu.

2.3.1.5 Měrný výkon

Jedná se o výkon baterie vydělený vahou baterie [8]. Jednotkou je $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [8]. Některé baterie jsou charakteristické tím, že mají vysokou měrnou energii, ale nízký měrný výkon [8]. To znamená, že uchovávají velké množství energie, ale jsou schopny ji vydat velmi pomalu. Takže vozidlo je schopné ujet velkou vzdálenost, ale pomalou rychlostí. Výkon baterie udává, jak rychle je baterie schopna vydat svoji energii.

2.3.1.6 Geometrie baterie

Články baterie mohou být v různých tvarech. Vyrábí se cylindrické, prismatické, obdélníkové i šestihhranné články. Bateriové články obvykle bývají uloženy do obdélníkových tvarů, kterým se říká moduly [8]. Různé tvary baterií umožňují konstruktérům například uložit baterii do podlahy vozidla.

2.3.1.7 Teplota baterie

Většina baterií pracuje v teplotách totožných s okolím [8]. Některé vyžadují vyšší teploty, proto je třeba baterii zahřát při startu a v průběhu ji chladit. Jinak její výkon nebude optimální. Při výběru baterie musí být konstruktér pečlivý a vzít v úvahu její potřeby na zahřívání a chlazení během celého procesu navrhování.

2.3.1.8 Životnost baterie a počet cyklů

Životnost baterie a počet cyklů závisí na typu baterie, na jejích parametrech a na způsobu, jakým je baterie využívána [8]. Životnost baterie je důležitá specifikace, protože má vliv na provozní náklady elektromobilu. Pokud se baterie nepoužívá delší dobu, tak se může o nějakou hodnotu vybit. Tomuto jevu se říká samovybití. Na míru vybití má vliv typ baterie, a také okolní podmínky, například teplota.

2.3.2 Typy baterií

Baterie lze dělit různě. Například podle tvaru nebo podle toho, kde se využívají apod. V této kapitole je uvedeno dělení baterií na základě materiálů, kterými jsou tvořeny.

2.3.2.1 Olověné baterie

Nejstarší, ale stále jednou z používaných baterií je olověná baterie. Baterie byla vyvinuta francouzským fyzikem Gastonem Plantem v roce 1860. Pozitivní deska je tvořena hnědým oxidem olovnatým a negativní deska je z olovnatého kovu. Tyto desky jsou ponořeny do elektrolytu, kterým je zředěná kyselina sírová. [5]

Olověné baterie jsou nejlevnějšími bateriemi a v minulosti byly také nejběžnějším zdrojem pro elektricky poháněné automobily. Největším problémem olověných baterií byl vliv na životní prostředí kvůli jejich výrobě, použití, likvidaci a recyklaci. Olovo také může mít velmi vážný dopad na zdraví organismů. Tento problém se však začal řešit. Nyní v USA a v EU úroveň sběru a využití olova dosáhla 99 %. Což je ve srovnání s ostatními výrobky vysoká míra využití. Ve vyspělých zemích je recyklováno 95 – 99 % použitých baterií. [5]

V současnosti se olověné baterie používají pro vozidla pohybující se v malých rychlostech. Využití najdou u vysokozdvížných vozíků, golfových vozíků a skútrů. Důvodem, proč se u moderních elektromobilů nepoužívá, je nižší měrná energie a nižší hustota energie. V porovnání s Lithium-ion bateriemi to znamená, že pro dosažení stejné hustoty energie a měrné energie bude olověná baterie větší a těžší. To se samozřejmě nehodí, protože objem a hmotnost akumulátoru jsou klíčové parametry při navrhování elektromobilů. [5]

Výhody olověných baterií [5]:

- lehká a levná výroba,

- ověřená, spolehlivá a dobře poznaná technologie,
- úroveň samovybíjení je velmi nízká (40 % za rok),
- schopná vysoké rychlosti výboje.

Nevýhody olověných baterií [5]:

- nízká měrná energie a nízká hustota energie,
- nelze skladovat ve vybitém stavu, kvůli klesajícímu napětí článku,
- nebezpečná pro životní prostředí,
- při špatném nabití může docházet k tepelnému úniku,
- relativně dlouhá doba nabíjení (8 – 16 hodin).

2.3.2.2 Nikl-metal hydridové baterie

Můžeme říct, že baterie založené na niklu tvoří celou rodinu baterií. Tyto baterie mají pozitivní elektrodu tvořenou hydroxidem niklu. Elektrolytem je roztok hydroxidu draselného. Záporná elektroda je tvořena různými materiály, podle kterých jsou tyto baterie dále děleny. Jsou to například nikl-železo (Ni-Fe) baterie, nikl-kadmium (Ni-Cd) baterie, nikl-vodík (Ni-H₂) baterie, nikl-zinek (Ni-Zn) baterie. Ovšem nejpoužívanějším typem v elektromobilech byla nikl-metal hydridová (Ni-MH) baterie, kde je záporná elektroda tvořena směsí hydridů. [5]

Ni-MH baterie se jeví jako ideální pro použití v elektromobilech. V porovnání s olověnými bateriemi mají až 2x větší měrnou energii. Tím je umožněno, aby elektricky poháněná vozidla s Ni-MH baterií byla výrazně lehčí. Vozidla s nižší hmotností mají nižší náklady na energii při pohánění. Ni-MH akumulátor má také větší hustotu energie, to znamená, že není tak náročný na prostor. Hlavním problémem je vysoká úroveň samovybíjení, ta může dosahovat až 12,5 % denně při pokojové teplotě. S vyšší teplotou tato hodnota roste. Ni-MH baterie tedy nejsou vhodné pro využití v oblastech s teplejším klimatem. [5]

V posledních letech využívání a vývoj Ni-MH baterií v elektromobilech stagnuje kvůli právním sporům ohledně patentu velkoformátových Ni-MH akumulátorů. [9]

Výhody Ni-MH baterií [5]:

- vyšší měrná energie oproti olověným bateriím,
- vyšší hustota energie oproti olověným bateriím.

Nevýhody Ni-MH baterií [5]:

- vysoká úroveň samovybíjení,
- nízká efektivita nabíjení,
- cenově srovnatelné s li-ion bateriemi.

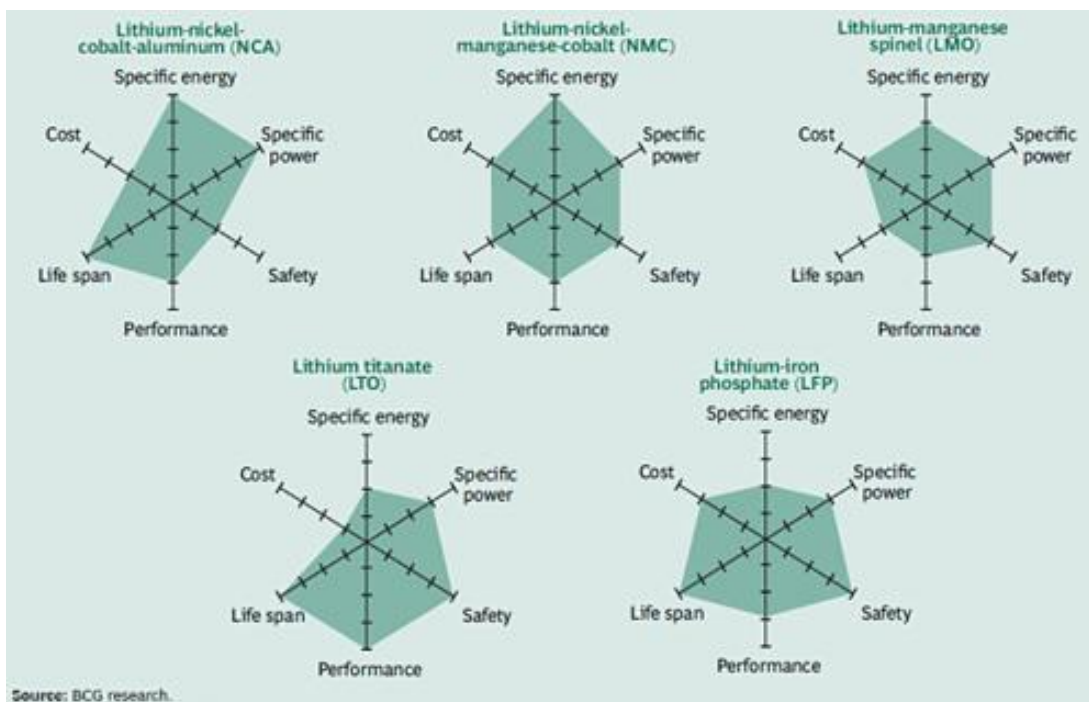
2.3.2.3 Lithium-ion baterie

Jsou to právě lithium-ion baterie, které dnes dominují na trhu elektromobilů. Nejprve se vědci snažili vyrobit baterii z lithiového kovu. Nicméně tyto pokusy selhaly, kvůli nestabilitě tohoto kovu, a to hlavně při nabíjení. Proto se vývoj zaměřil na nekovovou lithiovou baterii využívající lithiové ionty. Lithium-iontové baterie jsou bezpečné, musí však být dodržena určitá bezpečnostní opatření. První komerčně vyráběná lithium-iontová baterie byla od společnosti SONY v roce 1991. [10]

Lithium-iontové baterie mají mnoho předností. Především měrná energie a hustota energie jsou oproti ostatním typům baterií lepší. Dobré jsou také při zachování energie, jejich hodnota samovybití je 5 % za měsíc [9]. Li-ion baterie mají i nevýhody. Těmi největšími jsou cena akumulátoru a bezpečnost. Velké bezpečnostní znepokojení plyne z přebití a přehřátí těchto baterií. U lithium-iontových baterií může dojít k tepelnému úniku, což může vést k požáru či dokonce k explozi [9]. Proto bylo vynaloženo velké úsilí k vývoji bezpečnostních systémů, aby tyto baterie byly bezpečnější. To se samozřejmě promítá i ve výsledné ceně.

Li-ion baterie je charakterizována podle materiálu, který je obsažen v katodě (záporně nabitá elektroda). Podle tohoto materiálu dělíme lithium-iontové baterie na lithium kobaltnaté (LiCoO_2), lithium manganové (LiMn_2O_4 nebo LMO), lithium železitě fosfátové (LiFePO_4 nebo LFP), lithium-nikl-mangan-kobaltové (LiNiMnCoO_2 nebo NMC), lithium-nikl-hliník-kobaltové (LiNiCoAlO_2 nebo NCA) a lithium titanové ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ nebo LTO). Anoda, tedy kladně nabitá elektroda, byla dříve vyráběná z koksu (uhelný produkt). Dnes je využívaným materiálem na anodu grafit, ale zkouší se i různá aditiva na bázi křemíku nebo titanu. Pomocí křemíku baterie dosáhne 20 – 30 % zvýšení měrné energie, ovšem za cenu zkrácení životnosti baterie. Naopak titan jako anodové aditivum vykazuje dobrou životnost baterie, dobré možnosti zatížení, vynikající výkonové parametry při nízkých teplotách a vyšší bezpečnost, ale měrná energie je nižší. Elektrolyt li-ion baterií je tvořen lithiovou solí. [11]

Na následující obrázku lze vidět porovnání některých typů lithium-iontových baterií z hlediska měrné energie, měrného výkonu, ceny, životnosti, bezpečnosti a výkonu. Tyto parametry jsou dále popsány na následující stránce.



Obrázek 2 - Porovnání Li-ion baterií [12]

Jedním z nejdůležitějších aspektů pro použití akumulátorů v elektromobilech obecně je bezpečnost. V dnešní době, kdy mají media masivní vliv na společnost, může jediný incident zveličený médii obrátit veřejnost proti elektromobilům. A elektromobilita je mediálním tématem. Jak již bylo řečeno výše, největším bezpečnostním problémem Li-ion je tepelný únik baterie [9]. Proto byly navrženy speciální bezpečnostní obvody a jejich robustní bezpečnostní kryty, které toto nebezpečí prakticky eliminují. Kryty také slouží k zajištění bezpečnosti baterie při nesprávném použití.

Životnost baterie určuje počet cyklů anebo celkovou ujetou vzdálenost. Obecně se životnost li-ion akumulátorů udává 8 – 10 let popřípadě 160 000 km [12]. Stárnutím baterie dochází ke ztrátě kapacity. Výrobcům elektricky poháněných automobilů stále chybí dostatek informací, jak baterie stárnou při různých uživatelských a klimatických podmínkách. Mnohdy výrobci navrhují větší baterie, aby částečně vykompenzovali ztrátu kapacity [12].

Cena představuje největší nevýhodu lithium-iontových baterií. Ačkoliv se náklady na výrobu v posledních letech podařilo snížit, baterie stále představují největší podíl z celkové ceny elektromobilu. Například u elektromobilů značky Tesla, cena samotné baterie odpovídá ceně automobilů s klasickým spalovacím motorem.

2.3.2.4 Ostatní baterie

Do kategorie ostatních baterií řadím akumulátory, které sice byly navrhovány a vyvíjeny i pro využití v elektromobilech, ale na jejich použití došlo jen zřídka. Myslím si, že za zmínku

v této práci stojí, kvůli jejich koncepčním a konstrukčním odlišnostem oproti již zmíněným bateriím.

Prvním zvláštním akumulátorem je baterie založena na sodíku. Do této kategorie patří baterie využívající chlorid sodný, přezdívané ZEBRA (Zero Emission Battery Research Association), a sodík sírová baterie. Tyto baterie se vyvíjely od 80. let minulého století. Jejich odlišnost od ostatních baterií spočívá v tom, že využívají jednu nebo více tekutých elektrod, kde použitým materiálem je roztavený sodík. Naopak elektrolyt je tvořen pevným keramickým materiálem. Další odlišností je jejich provozní teplota. Ta se pohybuje v rozmezí 300°C – 350°C. To znamená, že před použitím se musí tato baterie zahřát. [8]

Další zvláštní baterií je tzv. kov-vzduch baterie. Tyto baterie nelze dobíjet jednoduchým obrácením proudu, místo toho musí být vyměněny nebo přepracovány kovové elektrody. Elektroda může být tvořena hliníkem nebo zinkem. Ovšem pro elektromobily přichází v úvahu pouze zinková elektroda, protože hliník-vzduchová baterie ani z daleka nedosahuje potřebných parametrů. Principem je tedy výměna záporné elektrody při vybití baterie. Kovové elektrody tak mohou fungovat jako druh paliva. Vyhořelé palivo by se poté posílalo do zpracovatelského závodu, kde by se použilo na výrobu nového paliva. Použití výměnného paliva má výhodu v tom, že se nemusejí budovat dobíjecí místa. Další výhodou zinek-vzduch baterií je vysoká měrná energie, to může umožnit rozumnou ujetou vzdálenost mezi výměnami. [8]

2.3.2.5 Shrnutí

Nejlepší volbou pro elektromobily jsou lithium-iontové akumulátory. Z výše popsaných typů mají jednoznačně nejlepší měrnou energii, hustotu energie a měrný výkon. Z těchto důvodů prakticky dominují na trhu akumulátorů. Do budoucna se dá předpokládat další vývoj těchto baterií, popřípadě vývoj jiných baterií na bázi lithia. V tabulce 1 jsou shrnuty některé parametry olověných, nikel-metal-hydridových a lithium-iontových baterií.

Tabulka 1 – Technické specifikace jednotlivých typů baterií

	Olověné baterie	Ni-MH baterie	Li-ion baterie
Měrná energie [Wh*kg ⁻¹]	20 – 35	~ 65	140
Hustota energie [Wh*m ⁻³]	54 – 95	150	250 – 620
Měrný výkon [W*kg ⁻¹]	~ 250	200	300 – 1500
Provozní teplota [°C]	teplota okolí	teplota okolí	teplota okolí
Samovybití za měsíc [%]	4 – 6	až 30	10
Počet cyklů [-]	700 – 800	~ 1000	>1000
Nabíjecí čas [h]	8	1	2 – 3
Cena za kWh [Kč]	2000 – 4500	6000 – 13500	4000 – 23000

2.4 Elektromotor

Elektrický motor tvoří jádro pohonu elektromobilu. Úkolem elektromotoru je převádět elektrickou energii baterie na mechanickou energii. Elektrický proud může být jak stejnosměrný, tak střídavý. Záleží vždy na konkrétním typu motoru, jenž je v elektromobilu použit. Nejčastěji používanými motory v elektricky poháněných vozidlech jsou bezkomutátorové stejnosměrné motory, synchronní motory s permanentními magnety, asynchronní indukční motory a spínané reluktanční motory. Hlavními požadavky na tyto stroje jsou robustnost, vysoká účinnost, vysoký točivý moment, vysoký výkon, široký rozsah otáček, snadnost ovládání, nízká hlučnost, nízká cena a malá velikost.

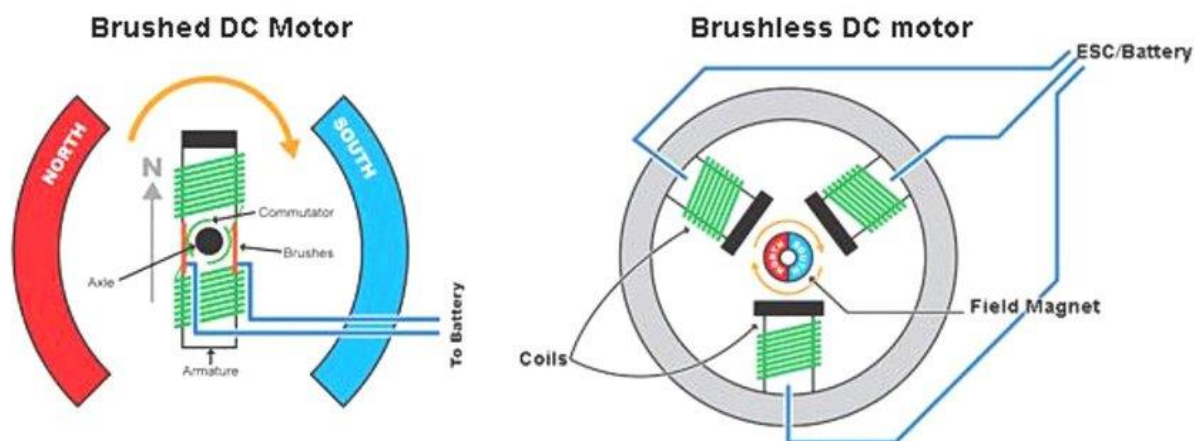
Obecně lze říct, že každý elektromotor se skládá z pohyblivé části – rotor a z části, která je statická – stator.

2.4.1 Bezkomutátorový stejnosměrný motor

Bezkomutátorový DC motor je stroj, který ke své funkci nepotřebuje komutátory neboli kartáče. Pro vysvětlení principu funkce je nutné nejprve pochopit fungování kartáčových elektromotorů. Rotor u kartáčových strojů je tvořen elektromagnetem a stator tvoří magnety. [13] Když se do elektromagnetu přivede elektrický proud, tak se vytvoří magnetické pole, které je přitahováno a odpuzováno magnety ve statoru. Rotor se tedy podle toho otočí. Komutátor slouží k přehazování pólů magnetického pole vytvořené elektromagnetem. A tím umožňuje, aby se rotor točil.

U bezkomutátorového stejnosměrného motoru jsou permanentní magnety přesunuty na rotor. Elektromagnet je přemístěn do statoru a tvořen může být i více cívkami. Namísto kartáčů je komutace dosaženo pomocí elektronických spínačů, které mění póly elektromagnetu. Elektronické spínače musí být synchronizovány s polohou rotoru. Poloha rotoru může být snímána například Hallovými senzory, ale existuje i řízení bez senzorů. Pro bezsenzorové řízení je zapotřebí složitější spínací elektroniky a přesných řídicích algoritmů. Výhodou řízení bez senzorů je nižší cena. [5]

Bezkartáčový stejnosměrný motor se využíval v elektricky poháněných vozidlech dříve, dnes už existují vhodnější a účinnější motory. Jeho výhodou může být široký rozsah rychlostí, bezpečnost, jednoduchá konstrukce a nižší cena. [5]



Obrázek 3- Porovnání kartáčového a bezkartáčového DC motoru [14]

2.4.2 Synchronní motor s permanentními magnety

Synchronní motor s permanentními magnety (PM) je výhodný díky svému výkonu, vysoké účinnosti a jednoduché konstrukci. Stejně jako u bezkartáčových DC motorů jsou permanentní magnety zabudované v rotoru.

Tyto motory se dělí na dva typy. Podle umístění permanentních magnetů v rotoru, rozlišujeme synchronní motor s vnitřními permanentními magnety (Interior Permanent Magnet – IPM) a synchronní motor s povrchovými permanentními magnety (Surface Permanent Magnet – SPM). Na první pohled se může zdát, že rozdíly mezi uvedenými typy nejsou velké, ale umístění magnetů v rotoru způsobuje odlišnou provozní charakteristiku motoru. [5]

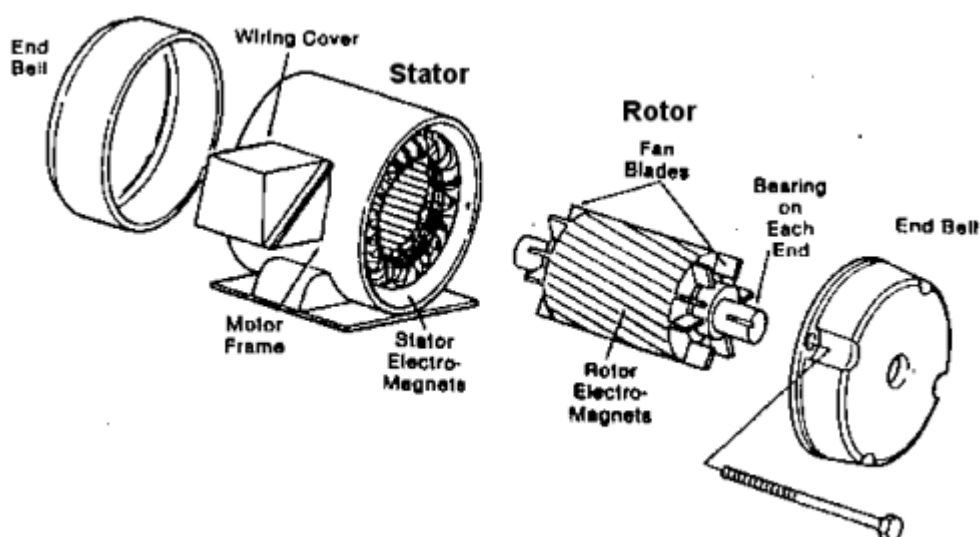
IPM má permanentní magnety umístěné uvnitř rotoru. Rotor tedy může být pevnější, což umožňuje jeho rychlejší otáčení. Problémem IPM je jeho magnetická nesymetričnost a proměnlivá indukčnost rotoru. To způsobuje, že rotor produkuje navíc reluktanční moment. Proto se u elektromobilů používá druhý typ, tedy synchronní motor s permanentními magnety umístěnými na povrchu rotoru. Motor má sice o něco menší otáčky (rychlost otáčení a také robustnost motoru je dána pevností spoje mezi povrchem rotoru a permanentním magnetem), ale nevzniká žádný reluktanční moment nad rámec složky magnetického momentu permanentního magnetu. To má za následek, že řízení SPM je snazší než IPM. [27]

Řízení otáček synchronního motoru s permanentními magnety v elektromobilech probíhá pomocí vektorového řízení. Zde se využívá proudová a otáčková regulace. Sledováním polohy magnetického pole při chodu motoru se vypočítávají otáčky. Hodnoty otáček jsou zásadní pro regulátor proudu a regulátor otáček. Nezbytnou součástí pro řízení jsou také výkonné a rychlé mikroprocesorové obvody. Dobrým řízením otáček se zlepší plynulost otáčení rotoru a sníží se tím ztráty, čímž dojde ke zvýšení výkonu motoru. [27]

Největší nevýhodou synchronního motoru s permanentními magnety je demagnetizace materiálu. K té dochází vlivem vysoké teploty a vibrací. Proto je nutné používat materiály s vysokou magnetizací, to jsou například různé slitiny vzácných kovů (neodym-železo-bór, samarium-kobalt). Hodnota magnetizace dosahuje 0,8 – 1,2 T [15]. To je dvakrát až třikrát více než ferrity, které dosahují 0,4 T [15]. Použití těchto vzácných kovů způsobují další nevýhodu tohoto motoru, což je vyšší cena.

2.4.3 Třífázový asynchronní motor

Dalším často používaným motorem v elektromobilech je třífázový asynchronní motor, který se také nazývá indukční motor. Konstrukčně je indukční motor podobný motoru s permanentními magnety. S tím rozdílem, že u asynchronního motoru nenajdeme žádné permanentní magnety. Stator i rotor je tvořen elektromagnetickými cívkami. Motor pracuje na principu magnetické indukce. Cívky ve statoru vytváří otáčivé magnetické pole. Toto pole vytváří indukované napětí ve vinutí rotoru. V rotoru, díky tomu, že vinutí je zapojeno na krátko, vnikají zkratové proudy. Tento proud následně roztáčí motor. Otáčivé (statorové) magnetické pole a rotorové magnetické pole musí mít rozdílné frekvence, jinak by se neindukovalo napětí a motor by se netočil. Rotor se točí s odlišnou frekvencí než otáčivé magnetické pole, a proto se motor nazývá asynchronní. Rozdíl mezi těmito otáčkami se nazývá skluz. Skluz se udává v procentech, u méně výkonných motorů se pohybuje od 10 do 15 %. U výkonných třífázových motorů je skluz od 2 do 5 %. Řízení otáček u indukčních motorů je zajištěno vektorovým řízením nebo metodou přímým řízením točivého momentu. Řízení je složitější než u motorů s permanentními magnety. [16]

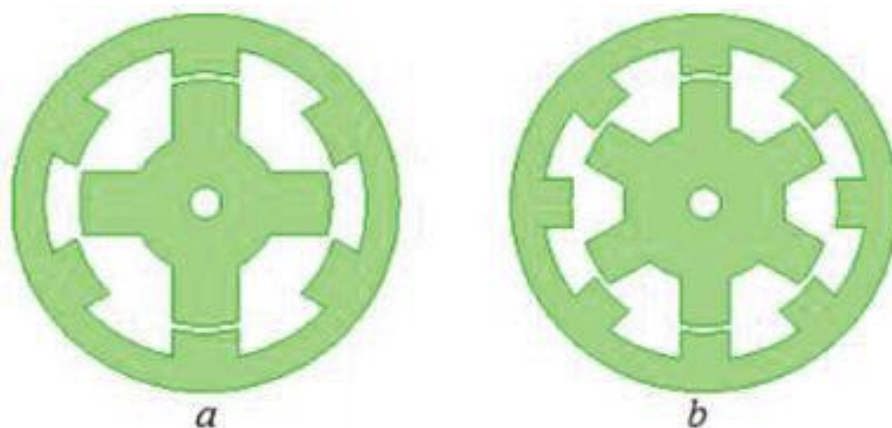


Obrázek 4 - Schéma indukčního motoru [17]

2.4.4 Spínaný reluktanční motor

Spínaný reluktanční motor je svou konstrukcí odlišný od ostatních typů elektromotorů. V rotoru se totiž nenacházejí žádné permanentní magnety ani žádné cívky. Rotor je v podstatě tvořen vrstvenou ocelí. Základním konstrukčním rysem je, že ve statoru i v rotoru se nacházejí výčnělky. Stator je tvořen několika fázovou soustavou vinutí, která vytváří elektromagnetický točivý moment. Očekává se, že pro svou jednoduchost, robustnost a pevnost, bude tento typ motoru v budoucnu stále více využíván v elektromobilech.

Jednotlivé výčnělky statoru a rotoru určují póly motoru. Podle poměru počtu pólů statoru k pólům rotoru rozlišujeme třífázový a čtyřfázový spínaný reluktanční motor. U třífázového je tento poměr 6:4, u čtyřfázového je 8:6 [18]. Je třeba poznamenat, že existují i jednofázové a dvoufázové spínané reluktanční motory, nicméně tyto typy nejsou tak často používané. Na obrázku 5 je vidět rozdíl mezi třífázovým (vlevo) a čtyřfázovým (vpravo). Jedna fáze je tvořena póly na statoru směřujícími k sobě.



Obrázek 5 - Schéma reluktančního motoru [18]

Pokud póly statoru a rotoru nejsou zarovnané, pak magnetické pole, které je tvořeno cívkami statoru, má velkou reluktanci (magnetický odpor). To způsobuje otáčení rotoru. Póly na rotoru se snaží vyrovnat s póly statoru. Podmínkou fungování je přesné načasování napájení pólů statoru. Snímání polohy rotoru probíhá například pomocí Hallova senzoru podobně jako u bezkartáčových stejnosměrných motorů [19].

Spínané motory mohou dosáhnout většího zrychlení a rychlosti než motory s permanentními magnety. To je díky konstrukci rotoru, který má ve spínaných reluktančních motorech menší setrvačnost [19]. Další výhodou je konstrukční jednoduchost a nenáročnost na materiál. Naopak nevýhodou tohoto motoru je složité řízení. Nebo to, že jsou hlučnější než ostatní typy motorů, což je způsobené výčnělkami statoru a rotoru.

2.4.5 Shrnutí

V této práci jsou popsány 4 typy elektromotorů. V současné době lze řadit mezi nejpoužívanější motory v elektromobilech synchronní motory s permanentními magnety a třífázové asynchronní motory. Bezkomutátorové DC motory se dnes v elektromobilech již nepoužívají, kvůli horší účinnosti při nižším zatížení. Naopak u spínaných reluktančních motorů se očekává, že jejich využití v elektromobilech teprve přijde. V následující tabulce 2 je porovnání těchto typů elektromotorů z hlediska účinnosti.

Tabulka 2 - Účinnost jednotlivých typů motorů

	Účinnost při špičkovém zatížení [%]	Účinnost při zatížení 10% [%]
Bezkomutátorový DC motor	>95	70 - 80
Synchronní s permanentními magnety	>92	85 - 90
Indukční motor	>90	>90
Spínaný reluktační	>95	>90

2.5 Legislativa související s elektromobily

Důležité je si uvědomit, že pro elektromobily platí většinou stejné předpisy a požadavky pro proces schvalování jako pro automobily se spalovacím motorem. Výjimky pro elektromobil zde však jsou. Tou největší je, že u elektromobilu se neprovádí kontrolování a zkoušení emisí.

2.5.1 EHK/OSN č. 85

Tento předpis popisuje proces schvalování elektrického pohonu vozidel kategorie M a N z hlediska stanovení maximálního 30minutového výkonu a maximálního netto výkonu. Cílem je sestrojít křivku výkonu v závislosti na otáčkách. [20]

2.5.1.1 Netto výkon

Při stanovení maximálního netto výkonu se musí motor a jeho celá výstroj stabilizovat při teplotě (25 ± 5) °C nejméně po dobu 2 hodin. Pohonná jednotka musí být řádně zajata dle doporučení výrobce. Před zkouškou motor musí běžet 3 minuty na 80 % maximálního výkonu po dobu 3 minut. Při zkoušce je regulátor výkonu nastaven na maximum. Samotná zkouška nesmí být delší než 5 minut. [20]

2.5.1.2 Maximální 30minutový výkon

Tento výkon je určen maximálním netto výkonem, který je elektromotor schopen vydat po dobu 30 minut při stejnosměrném napětí. [20]

Na zkoušku musí být motor řádně zajištěn podle doporučení výrobce a stabilizovaný po dobu 4 hodin při teplotě (25 ± 5) °C. Hodnoty otáček a výkonu jsou nastaveny podle odhadu výrobce. Při zkoušce se zaznamenávají otáčky a výkon po celou dobu zkoušky, tedy 30 minut. Naměřené hodnoty výkonu se nesmí lišit o více než 5 % vzhledem k hodnotám nastavených na začátku zkoušky. 30minutový výkon se určí na základě průměru těchto naměřených hodnot. [20]

2.5.2 EHK/OSN č. 100

Tento předpis je určen pro schvalování vozidel z hlediska elektrického výkonového propojení. Zabývá se bezpečnostními požadavky na vozidla s elektrickým pohonem, které patří do kategorie M a N a jejich konstrukční rychlost převyšuje 25 km/h. [21]

2.5.2.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem

Zde se provádí, jak kontrola ochrany před přímým dotykem, tak kontrola ochrany před nepřímým dotykem. Veškeré vodivé části či části, ve kterých je za běžného používání elektrické napětí, musí být nějakým způsobem chráněné. To se provádí vhodnou izolací, krytem, překážkou atd. Ochrannou část nesmí být možné odmontovat bez použití nářadí. Dále se měří také izolační odpor.

2.5.2.2 Dobíjecí systém pro uchování energie (REESS)

Při zkoušce se kontroluje, zdali se systém REESS nepřehřívá. Pokud se systém přehřívá v důsledku velkého elektrického proudu, tak musí být vybaven ochrannými zařízeními (pojistky, jističe, stykače). Systém musí být opatřen obrázkem vysokonapěťového zařízení. [21]

Pokud je trakční baterie otevřeného typu, tak se kontroluje, zdali se nekumuluje plynný vodík v místech uložení baterie. K předcházení kumulace plynů musí být v tomto místě zajištěné odvětrávání. [21]

2.5.2.3 Funkční bezpečnost

Při zkoušce funkční bezpečnosti se testují spíše informační věci na vozidle. Například, že řidič musí být alespoň krátce upozorněn, když je vozidlo ve stavu aktivní možné jízdy. Když je vozidlo připojeno ke vnějšímu zdroji energie (dobíjí se), tak pohyb vozidla, který by byl vyvolaný jeho vlastním pohonem, nesmí být možný.

2.5.2.4 Stanovení emisí vodíku

U všech vozidel vybavených trakční baterií otevřeného typu se provádí stanovení emisí vodíku. Zkouška se provádí ve speciální komoře pro měření emisí vodíku, komora musí pojmout celé vozidlo. Emise vodíku jsou měřeny analyzátozem vodíku, ten je umístěn v komoře. Měření probíhá při nabíjení baterie. [21]

2.5.3 EHK/OSN č. 101

Tento předpis se vztahuje na vozidla kategorie M1 a N1. Předepisuje, jak měřit akční dosah na elektřinu a spotřebu elektrické energie. [22]

Pro obě zkoušky musí vozidlo být řádně zajeto. To znamená, že musí ujet během 7 dní před měřeními nejméně 300 km [22]. Stav vozidla, jako například nahuštění pneumatik, musí odpovídat hodnotě udávané výrobcem. Všechna zařízení, které mohou spotřebovávat elektrickou energii a jsou nepotřebná k obvyklému provozu vozidla za dne, musí být vypnuté.

2.5.3.1 Spotřeba elektrické energie

Zkouška probíhá v uzavřených prostorách při teplotě mezi 20 – 30°C a skládá se z následujících kroků: počáteční nabití baterie, aplikace jízdního cyklu, nabití baterie, výpočet spotřeby elektrické energie. Spotřeba elektrické energie se definuje vzorcem: $c = \frac{E}{D_{test}}$, kde E je naměřená hodnota energie ve Wh (při nabíjení po aplikaci jízdního cyklu), D_{test} je vzdálenost ujetá v průběhu zkoušky v km. Spotřeba elektrické energie je dána ve Wh/km. [22]

2.5.3.2 Akční dosah na elektřinu

Akčním dosahem na elektřinu je vzdálenost, kterou je vozidlo schopno ujet z plně nabitě baterie nebo z jiného zásobníku elektrické energie. Tato vzdálenost je vyjádřena v km. [22]

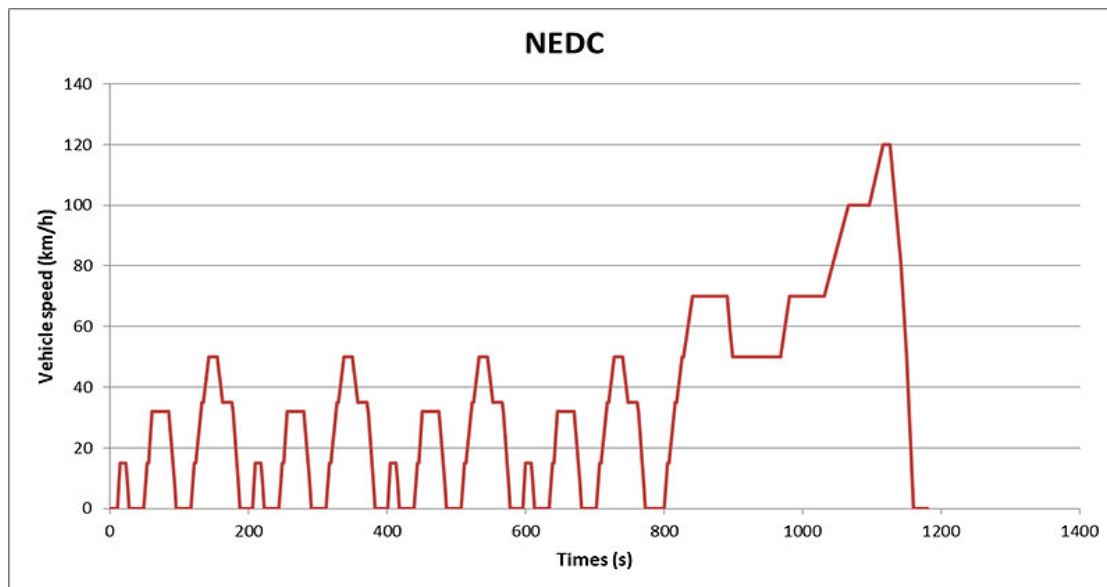
Zkoušku lze provádět v uzavřeném prostoru při teplotě 20 – 30°C nebo venku na zkušební dráze při teplotě okolí mezi 5°C až 32°C. Prvním krokem zkoušky je počáteční nabití baterie, druhým krokem je aplikace jízdního cyklu. Jízdní cyklus je stejný jako v kapitole 2.5.3.1. S ohledem na lidské potřeby jsou v průběhu zkoušky možné až 3 přestávky, nesmějí být však delší než 15 minut. Zkouška končí, když už vozidlo není schopno dodržovat požadovanou křivku do 50 km/h, nebo pokud běžné palubní přístroje ve vozidle dávají řidiči signál k zastavení vozidla. Naměřená vzdálenost v km je akčním dosahem na elektřinu. [22]

2.5.4 Nařízení komise EU 2017/1151

Toto nařízení platí pro všechny státy EU od 1. září 2017 a bylo zavedeno v reakci na kritiku veřejnosti ohledně neodpovídající spotřebě vozidel. [23] Nepřesnosti byly způsobeny jízdním cyklem NEDC. Cyklus neodpovídal skutečné charakteristice jízdy, proto byla udávaná spotřeba nižší než skutečná. Nová WLTP metodika byla vyvinuta na základě skutečných jízd

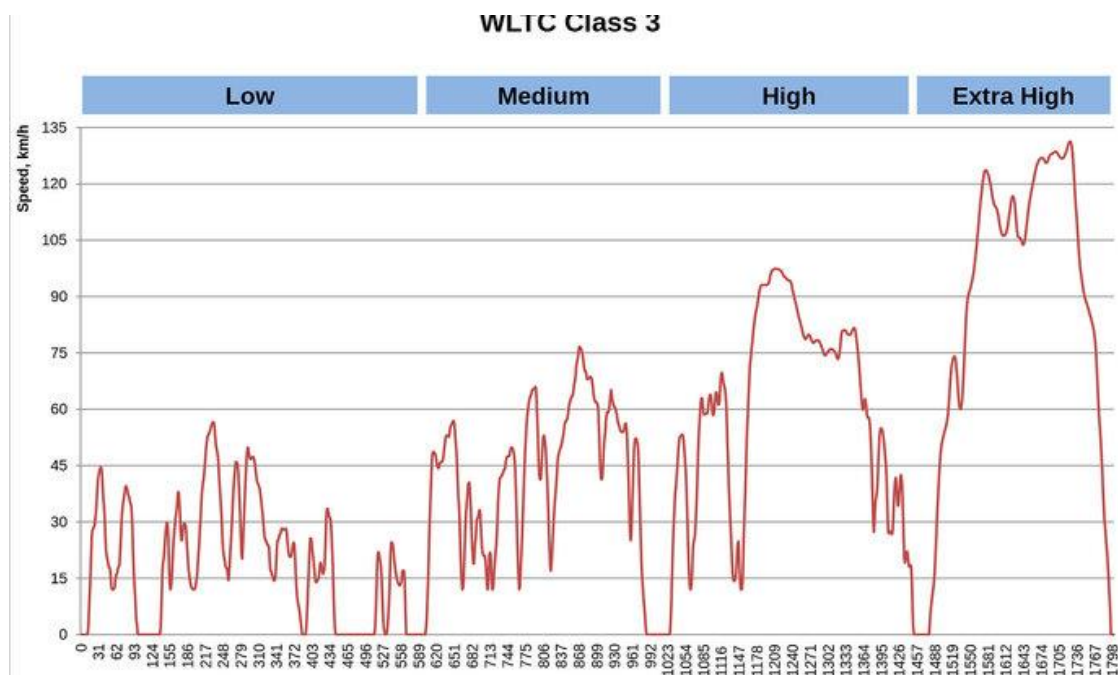
vozidel z celého světa. Zohledňují se u něj také jízdní odpory. WLTC cyklus, který je při této metodice používán, se dělí na 3 kategorie. O kategorii, ve které je dané vozidlo zkoušené, se rozhoduje podle jeho výkonu a hmotnosti [24]. Většina vozidel spadá do kategorie 3 [24].

2.5.4.1 Porovnání jízdních cyklů NEDC a WLTP



Obrázek 6 - NEDC cyklus [23]

Cyklus NEDC byl vyvinut v 70. letech minulého století. Jak lze z obrázku 6 vidět, skládá se ze čtyř menších stejných částí a jedné větší části. Menší části mají simulovat provoz ve městě, větší část provoz na rychlostní komunikaci. Doba cyklu je 1180 minut, přičemž se dosáhne maximální rychlosti 120 km/h. Ujetá vzdálenost při jednom cyklu je 11 007 m. [23]



Obrázek 7 - WLTC cyklus 3. kategorie [23]

Na první pohled lze vidět, že WLTC cyklus je mnohem dynamičtější, má kratší doby stání a prudší zrychlení. Konkrétně cyklus WLTC 3. kategorie se skládá ze 4 částí (nízké zatížení, střední zatížení, vysoké zatížení, extra vysoké zatížení). Celková doba cyklu je 30 minut, maximální rychlost činí 132 km/h a ujetá vzdálenost je 23 266 m. [23]

V této práci dále bude využíván pro návrh pohonu vozidla WLTC 2. kategorie, který se od 3. kategorie liší tím, že neobsahuje úsek „extra high“. Maximální rychlost v tomto cyklu je 90 km/h a testované vozidlo ujede vzdálenost 14 664 m po dobu 1477 sekund. [28]

3 Průzkum trhu malých městských elektrických vozidel

O elektromobilitě se mluví jako o budoucnosti automobilového průmyslu. Výrobce automobilů po celém světě investují nemalé náklady na vývoj elektromobilů. Proto v dnešní době můžeme najít na aktuálním trhu elektromobil téměř u každého výrobce. Obecně jsou automobily na elektřinu dražší oproti typově stejným automobilům s konvenčním pohonem. V tomto průzkumu se zaměřuji na elektromobily, které jsou díky svým malým rozměrům vhodné do městského provozu. Tyto malé elektromobily jsem shrnul do následující tabulky 3. Zajímaly mě především parametry z hlediska pohonu. Hodnoty, které jsou označeny „pomlčkou“, se mi nepodařilo dohledat.

Tabulka 3 - Technické specifikace malých městských elektromobilů

Název elektromobilu	Škoda Citigo iV	Smart EQ Fortwo	Honda E	Renault Zoe R135	E:go Life 20	Renault Twizy
Motor						
Typ	PM	PM	PM	PM	-	indukční
Výkon [kW]	61	60	110	100	20	13
Točivý moment [Nm]	212	160	300	245	-	57
Baterie						
Typ	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion
Energie [kWh]	36,8	17,6	35,5	52	14,9	6,1
Počet článků	168	96	-	192	-	42
Provozní vlastnosti						
Dojezd [km]	260 (WLTP)	155 (NEDC)	200 (-)	395 (WLTP)	112 (-)	100 (NEDC)
Spotřeba (WLTP) [kWh/km]	12,7	12,9	18	-	14,2	-
Maximální rychlost [km/h]	130	130	150	140	112	80
Zrychlení (0-100) [s]	12,5	11,5	8	9,9	7,7	6,6
Ostatní						
Délka [mm]	3597	2695	3895	4084	3348	2338
Šířka [mm]	1645	1663	1750	1730	1748	1454
Výška [mm]	1492	1542	1512	1562	1581	1381
Pohotovostní hmotnost [kg]	1229	1085	1514	1480	1150	478

Aktuální trh malých elektrických vozidel nabízí relativně dobrá vozidla od výrobců ověřených automobilových značek. Z hlediska ceny vyčnívají dva elektromobily, jedná se o Hondu E a Renault Zoe. Jejich cena začíná kolem 900 000 Kč. Na druhou stranu, Honda za připlacené peníze nabídne největší výkon a točivý moment, Renault Zoe zase s přehledem největší dojezd. Další v pořadí, dle ceny, je Smart Fortwo s cenovkou začínající na 691 690 Kč. Smart je výkonově srovnatelný se Škodou Citigou. Avšak Škoda nabídne zhruba o 100 km větší dojezd a více jak dvojnásobnou kapacitu baterie, přestože je o 150 000 Kč levnější.

Dalším vozidlem, s podobnou cenovkou jako Škoda, je E.go Life (420 000 Kč). V porovnání se Škodou má E.go horší výkon, kapacitu baterie i provozní vlastnosti, a to ve všech třech nabízených variantách. Nejlevnějším elektromobilem a také elektromobilem s nejmenším výkonem je v mém průzkumu Renault Twizy. Cena tohoto vozidla je 319 900 Kč. Je třeba uvést, že toto vozidlo je jednomístné a jeho hmotnost je o více než polovinu menší než hmotnost druhého nejlehčího elektromobilu v průzkumu.

3.1 Návrh

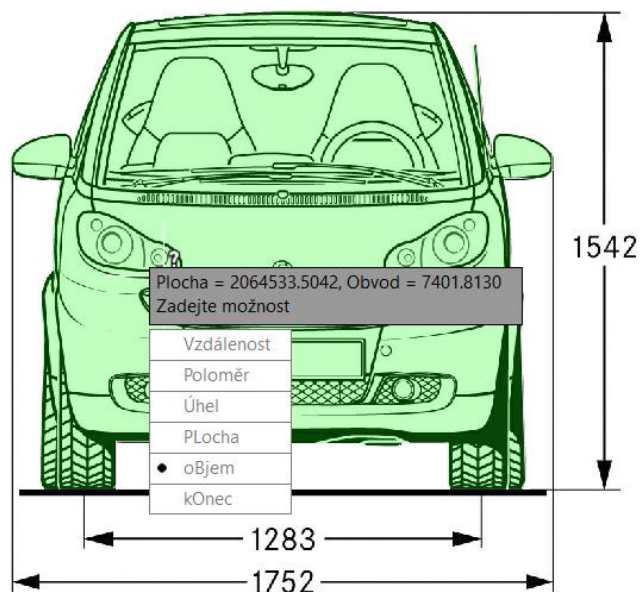
V dalších kapitolách vyberu hlavní komponenty pro pohon. Pro výběr je nutné nejdříve určit základní charakteristiky vozu. Poté budu vybírat komponenty na základě výše uvedených elektromobilů s tím, že nejvíce budu přihlížet na cenu.

3.1.1 Rozměry, hmotnost a těžiště vozidla

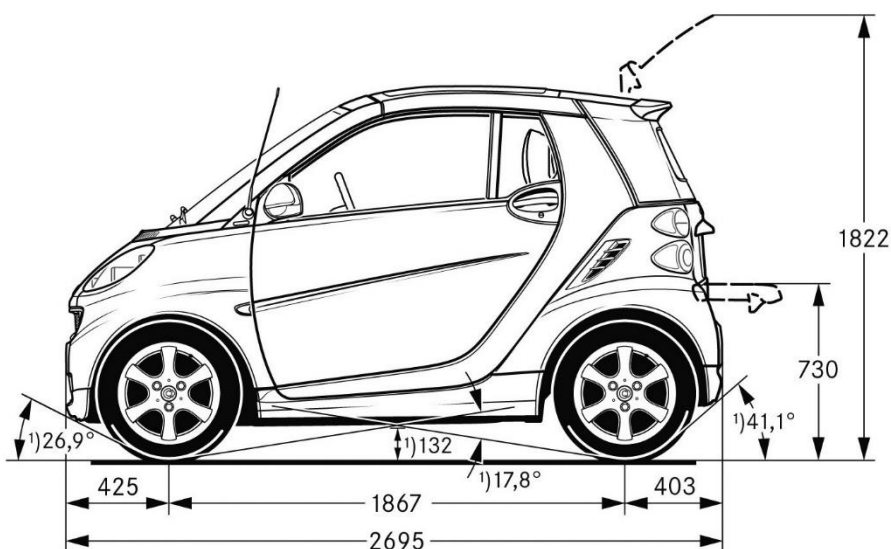
Z hlediska rozměrů bude navrhované vozidlo velmi malé, ale bude na rozdíl od Renaultu Twizy dvoumístné. Rozměry navrhovaného elektrického vozidla přirovnávám k Smartu Fortwo, který je nejmenší z vozidel v tomto průzkumu a zároveň má alespoň dvě místa k sezení. Z hlediska hmotnosti se chceme vejít do 450 kg bez baterie, takže po této stránce bude vozidlo podobné Renaultu Twizy.

Zajímá mě velikost čelní plochy automobilu. Jedná se o důležitý údaj, který je potřebný pro simulaci v následující kapitole. Bohužel skutečný údaj o čelní ploše není k dispozici, a proto k určení využiji vozidlo Smart Fortwo, které je rozměrově podobné. Vzhledem k tomu, že velikost čelní plochy je obvykle obtížně dohledatelný údaj, tak jsem se rozhodl, že k určení využiji nákres Smartu Fortwo, kde jsou vyobrazené rozměry a následně čelní plochu odměřím v programu AutoCad. Toto měření je zachycené na obrázku 8 na následující straně. Naměřená velikost čelní plochy Smartu je 2,064534 m².

Na polohu těžiště má vliv umístění baterie. Hmotnost baterie tvoří obvykle velký podíl hmotnosti vozidla, proto její umístění má vliv na polohu těžiště. Předpokládané umístění baterie v navrhovaném vozidle je buď to v podvozku, nebo pod sedačkami, aby bylo těžiště, co nejnižší. Z hlediska příčného a podélného umístění baterie se budeme snažit umístit baterii doprostřed, aby bylo rozložení hmoty na nápravy rovnoměrné. K určení polohy těžiště je nutné znát zatížení na nápravách, těžiště se poté určuje výpočtem pomoci momentů setrvačnosti. Zatížení na nápravách v tento okamžik neznám, proto příčnou a podélnou polohu těžiště zjednoduším, a to tak, že těžiště umístím doprostřed. Vzdálenosti těžiště od nápravy zadní a přední budou tedy rovny. Pro určení této vzdálenosti vyjdu opět z rozměrů Smartu Fortwo. Tato vzdálenost je 0,9335 m, což lze vyčíst z obrázku číslo 9.



Obrázek 8 - Čelní plocha Smartu Fortwo



Obrázek 9 - Rozměry Smart Fortwo [25]

3.1.2 Elektromotor

Vzhledem k tomu, že navrhovaný elektromobil bude sloužit především pro cesty studentů mezi fakultami v Praze a jeho hmotnost nebude velká, není potřeba velký výkon elektromotoru. Motory jsem vybíral na základě dostupnosti a ceny. Ke každému motoru je třeba také kontrolér pro řízení, ten je také vybírán na základě dostupnosti a ceny.

3.1.2.1 Motenergy ME1003

První vybraný elektromotor je od firmy Motenergy. Tento motor je nabízen v kitu i s kontrolérem od firmy Alltrax. Celková cena tohoto kitu je 28 733 Kč. Jedná se o komutátorový stejnosměrný motor. Parametry elektromotoru jsou v tabulce 4. Výhodou tohoto motoru je, že má široký rozsah provozního napětí.

Tabulka 4 - Technické specifikace Motenergy motor

Název motoru	Motenergy ME1003
Typ motoru	komutátorový DC
Výkon [kW]	11,5
Točivý moment [Nm]	35
Max otáčky [RPM]	3700
Napětí [V]	12 - 72
Váha [kg]	18
Cena za celý kit [Kč]	28 733

3.1.2.2 Iskra

Další vybraný elektromotor je od výrobce ISKRA. Výrobce přímo udává, že tento motor je vhodný pro Renault Twizy. Technické specifikace tohoto motoru jsou shrnuté v tabulce 5. Kontrolér pro tento motor jsem vybral od firmy Sevcon, model GEN4 4827 za 16 370 Kč.

Tabulka 5 - Technické specifikace ISKRA motoru

Název motoru	ISKRA
Typ motoru	indukční
Výkon [kW]	12
Točivý moment [Nm]	57
Max otáčky [RPM]	5800
Napětí [V]	48
Váha [kg]	38
Cena motoru [Kč]	27 200

3.1.2.3 HPEVS AC

Další vybraný motor je nabízen také v kitu. Jedná se o indukční motor od výrobce HPEVS. Kontrolér dodávaný k tomuto kitu je od výrobce Curtis. Technické specifikace motoru jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 - Technické specifikace HPEVS motor

Název motoru	HPEVS AC - 09 03.27
Typ motoru	indukční 3 -fázový
Výkon [kW]	21
Točivý moment [Nm]	95

Max otáčky [RPM]	7500
Napětí [V]	48 - 60
Váha [kg]	22,7
Cena za celý kit [Kč]	51 300

3.1.2.4 Motenergy ME1302

Poslední vybraný elektromotor je znovu od výrobce Motenergy. Ovšem tentokrát jde o synchronní motor s permanentními magnety. Na stránkách prodejce se udává, že vhodným kontrolérem pro tento motor je od výrobce Sevcon. Cena tohoto kontroléru pro tento motor je 17 492 Kč.

Tabulka 7 - Technické specifikace Motenergy SPM motor

Název motoru	Motenergy ME1302
Typ motoru	synchronní s PM
Výkon [kW]	14,5
Točivý moment [Nm]	80
Max otáčky [RPM]	5000
Max napětí [V]	72 - 96
Váha [kg]	15,9
Cena za motor [Kč]	26 009

Pro přehlednější porovnání vybraných elektromotorů uvádím tabulku 8, kde jsou uvedeny parametry všech vybraných motorů vedle sebe.

Tabulka 8 - Technické specifikace vybraných motorů

Název motoru	Motenergy ME1003	ISKRA	Motenergy ME1302	HPEVS AC
Typ motoru	komutátorový DC	indukční 3 - fázový	synchronní s PM	indukční 3 - fázový
Výkon [kW]	11,5	12	14,5	21
Točivý moment [Nm]	35	57	80	95
Max otáčky [RPM]	3700	5800	5000	7500
Napětí [V]	72	48	96	60
Váha [kg]	18	38	15,9	22,7
Cena [Kč]	28 733	27 200	26 009	51 300

3.1.3 Baterie

Jak již bylo řečeno, baterie je jednou z nejdůležitějších a nejdražších komponent na elektromobilu. Jediné baterie u elektromobilů, které jsem zahrnul do průzkumu, jsou Li-ion baterie. Z nich jsou nejdostupnějším typem lithium-železo-fosfátové akumulátory. Na základě uskutečněného průzkumu a kontaktování řady firem byly vybrány baterie od čínského výrobce

CALB. Tyto baterie vycházejí cenově nejvýhodněji. Jedná se o baterie tvaru „prismatic“ neboli kvádr. Technické specifikace v tabulce 9 jsou pro jeden článek. Pro snadnější zpracování v dalších částech této práce jsem baterie označil písmenem a číslovkami.

Tabulka 9 - Technické specifikace vybraných baterií

Označení baterie	B1	B2	B3
Typ	LiFePo ₄	LiFePo ₄	LiFePo ₄
Napětí [V]	3,7	3,2	3,2
Kapacita [Ah]	100	135	150
Hmotnost [kg]	1,7	3,3	2,95
Rozměr DxŠxV[mm]	149x52x95	170x48x175	174x48x171
Cena [Kč]	1918	1969	2174

Po výběru vhodného bateriového článku, přijde fáze modularizace, tedy sestavení do většího stavebního prvku. Po osazení řídicího systému baterie (BMS) vznikne bateriový modul. Při modularizaci baterie se musí počítat i s odvodem tepla či provozním tlakem baterie. Jednotlivé články mohou být zapojeny sériově nebo paralelně. Sériové zapojení se používá pro dosažení určitého napětí (napětí jednotlivých článků se při zapojení v sérii sčítá). Při paralelním zapojení se sčítá kapacita článků. Baterie se může sestavit do různých tvarů, což dále usnadňuje její umístění v automobilu. Často se využívá umístění v podlaze automobilu. Takové vozidlo má pak těžiště umístěné nízko, a to má pozitivní vliv na jízdní vlastnosti.

Ke správnému fungování baterie je třeba řídicí elektroniku (battery management system – BMS). Tento systém monitoruje jednotlivé články, chrání je při vybíjení a nabíjení. Dále také vyrovnává napětí, tak aby bylo stejné ve všech článcích baterie. BMS vybírám na základě napětí baterie a maximální proudu vybíjení. Dle provedeného průzkumu bylo zjištěno, že cena BMS pro vybrané baterie se pohybuje od 2 000 – 4 500 Kč.

3.1.3.1 Určení počtu článků baterie

U každého motoru je uveden údaj o napětí. Pro správnou funkci by vstupní napětí (napětí baterie) mělo odpovídat tomuto udávanému napětí. Motor by jinak zaostával po výkonové stránce. Proto je potřeba určit, kolik bateriových článků bude nutných k provozu daného elektromotoru. Napětí nechci mít menší než 48 V, protože při vybíjení se napětí snižuje a příliš nízké napětí by vedlo ke špatnému fungování baterie. Abych dosáhl ideálního napětí, tak budu sestavovat články do série. Vybrané bateriové články dosahují dostatečné kapacity, proto není nutné je skládat paralelně. Počet článků určuji také na základě energie, kterou mohou poskytnout. Tu udávám v kWh a určí se vynásobením kapacity a napětí. U této specifikace mi

byl vzorem Renault Twizy, který je přibližně stejně těžký jako navrhované vozidlo. V následujících tabulkách udávám specifikace baterií v konfiguraci s daným motorem.

Tabulka 10 - Konfigurace baterií k motoru M1

Motor M1 (Motenergy ME1003)			
Označení baterie	B1	B2	B3
Počet článků	16	15	15
Napětí článku [V]	3,7	3,2	3,2
Kapacita [Ah]	100	135	150
Celkové napětí [V]	59	48	48
Celková energie [kWh]	5,92	6,5	7,2
Celková hmotnost [kg]	27,2	45	44,25
Celková cena [Kč]	28770	29535	32610

Tabulka 11 - Konfigurace baterií k motoru M2

Motor M2 (ISKRA)			
Označení baterie	B1	B2	B3
Počet článků	13	15	15
Napětí článku [V]	3,7	3,2	3,2
Kapacita [Ah]	100	135	150
Celkové napětí [V]	48	48	48
Celková energie [kWh]	4,8	6,5	7,2
Celková hmotnost [kg]	22,1	45	44,25
Celková cena [Kč]	24935	29535	32610

Tabulka 12 - Konfigurace baterií k motoru M3

Motor M3 (HPVES)			
Označení baterie	B1	B2	B3
Počet článků	16	15	15
Napětí článku [V]	3,7	3,2	3,2
Kapacita [Ah]	100	135	150
Celkové napětí [V]	59	48	48
Celková energie [kWh]	5,9	6,5	7,2
Celková hmotnost [kg]	27,2	45	44,25
Celková cena [Kč]	28770	29535	32610

Tabulka 13 - Konfigurace baterií k motoru M4

Motor M4 (Motenergy 1302)			
Označení baterie	B1	B2	B3
Počet článků	20	23	23
Napětí článku [V]	3,7	3,2	3,2
Kapacita [Ah]	100	135	150
Napětí [V]	74	74	74
Celková energie [kWh]	7,4	9,9	11,1
Celková hmotnost [kg]	34	75,9	67,85
Celková cena [Kč]	38360	45287	50002

4 Návrh modelu v programu IGNITE

Pro svůj návrh využiji program IGNITE od společnosti Ricardo. V této kapitole popíšu tento program, dále navrhnu model. Poté blíže popíšu jednotlivé prvky modelu a jejich parametry.

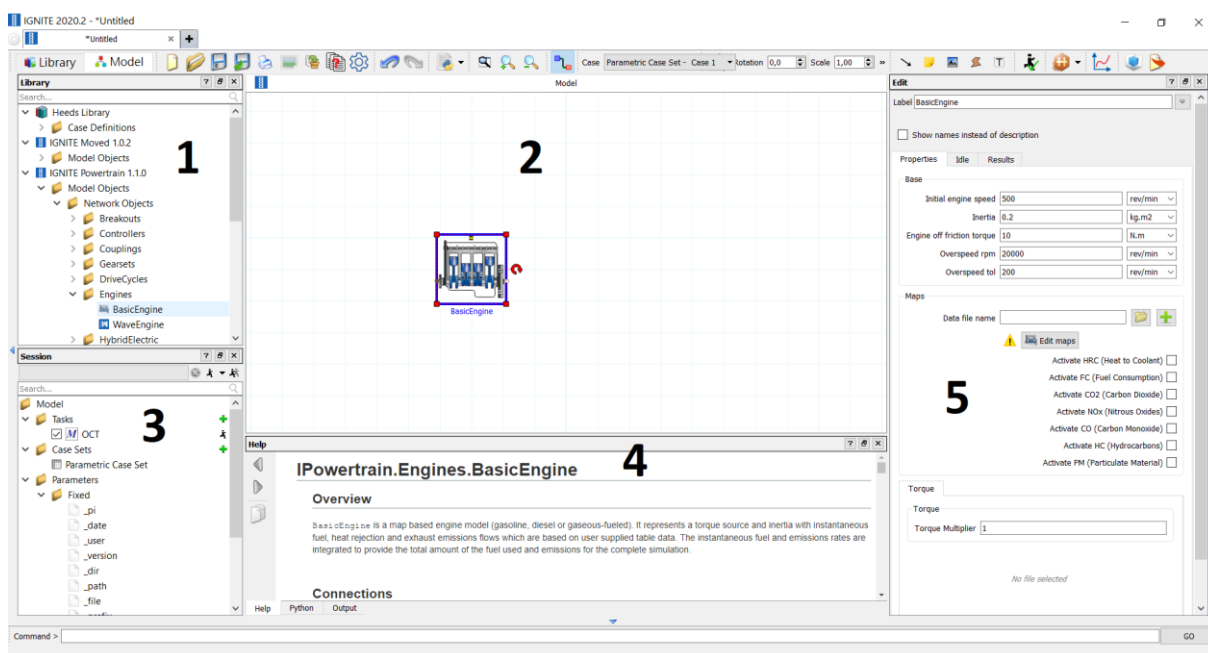
4.1 Popis programu IGNITE

IGNITE je speciální software, který byl zpřístupněn v roce 2013. Program byl vyvinut pro kompletní modelování a simulaci systémů vozidel. Uživatelům umožňuje přesně a rychle modelovat konvenční i vysoce komplexní systémy vozidel, a to na úrovni klasických, hybridních i plně elektrických automobilů.

IGNITE propojuje nástroje pro simulaci a optimalizaci, umožňuje tak modelování pro všechny fáze procesu vývoje systémů vozidel. Cílem je poskytnout uživatelům nástroje k rychlé analýze navrženého systému.

Grafické uživatelské rozhraní programu zahrnuje 2 módy. Library mód a Model mód. Módy jsou přístupné pomocí záložek v levé horní části programu. V IGNITE se modeluje pomocí objektů, které jsou obsažené v knihovnách (Library). V módu Library je možné spravovat, organizovat a importovat jednotlivé knihovny. Tuto možnost v mé práci nevyužívám, protože pro můj návrh mi plně postačují knihovny, které jsou v programu již importovány.

Model mód slouží pro modelování systému. Tento mód je zobrazen na obrázku 10. Jedná se o výchozí nastavení programu. Následně jsou popsána zobrazená podokna v tomto výchozím nastavení.

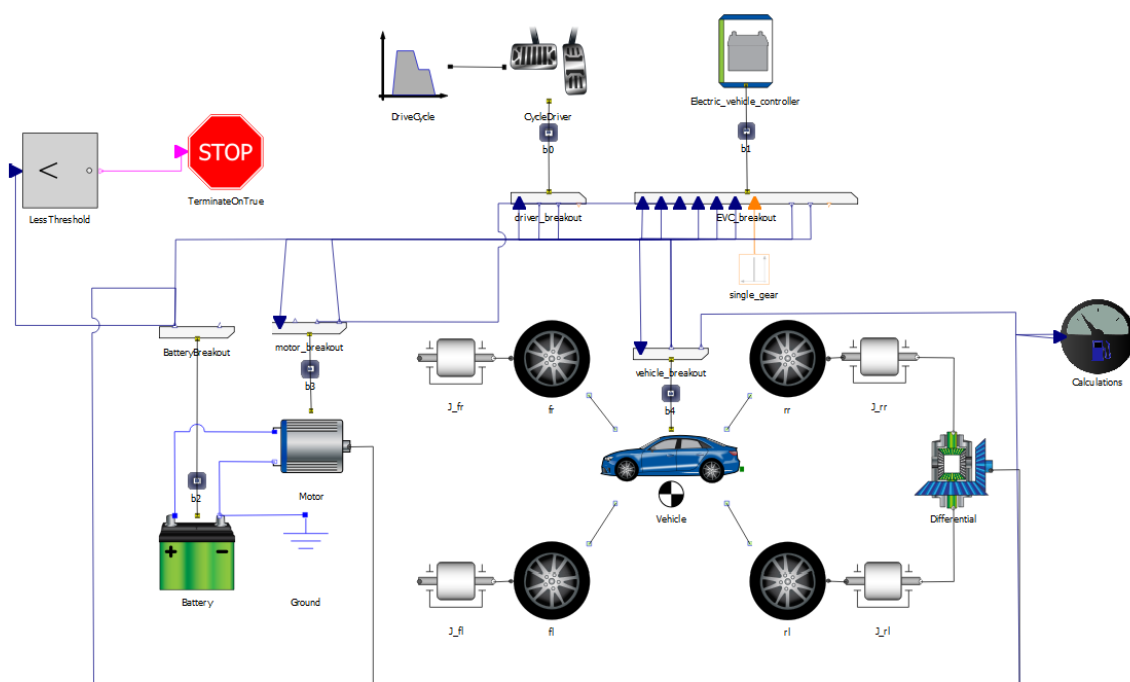


Obrázek 10 - Model mód v programu IGNITE

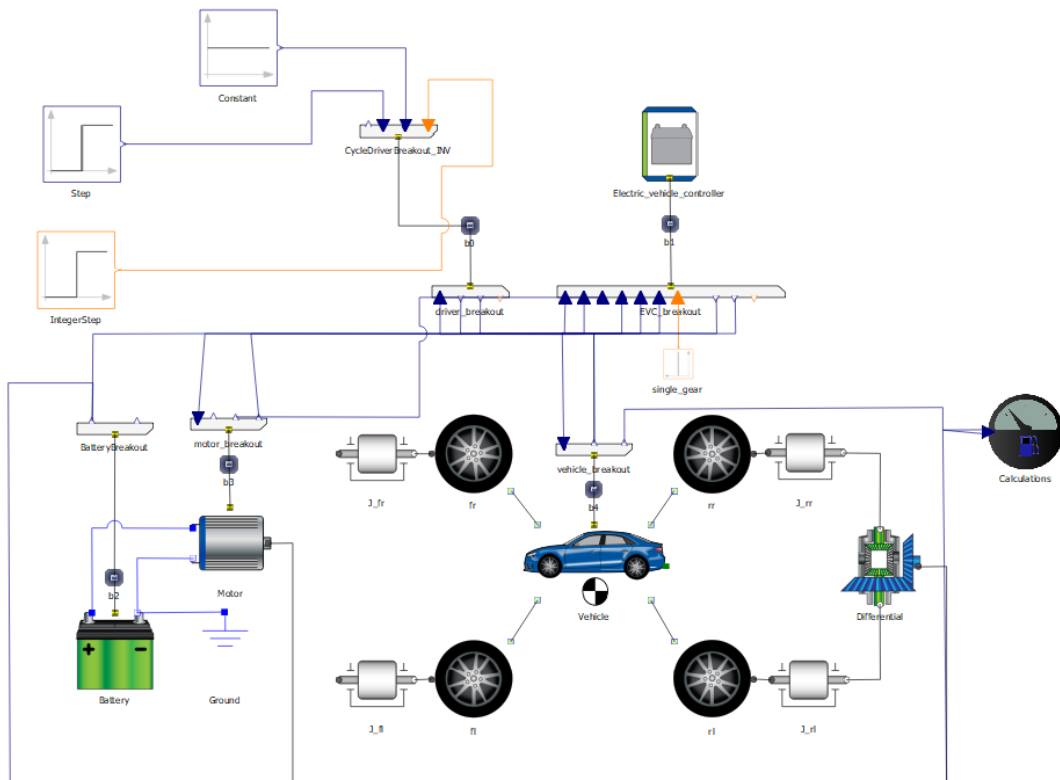
- 1) **panel Library** – Zde je zobrazen strom se seznamem všech dostupných prvků v knihovně. Tyto prvky představují objekty, které má uživatel k dispozici pro sestavování modelu.
- 2) **panel Model** – Tento panel představuje prostředí, ve kterém se tvoří model. V tomto panelu se definuje rozložení a architektura modelovaného systému. Architektura je tvořena pomocí vazeb mezi jednotlivými objekty.
- 3) **panel Session** – V tomto panelu se nachází výpis všech prvků, které byly přidány do aktuální relace. Tyto položky reprezentují objekty, které obsahuje modelovaný systém. Dále se přes tento panel provádí parametrizace modelu a spouští se zde simulace.
- 4) **panel Help** – V tomto podokně se zobrazuje nápověda k vybranému objektu v panelu Model.
- 5) **panel Edit** – Tento panel slouží k úpravě vlastností vybraného objektu. Obsahuje různé vstupní pole, které uživatel může definovat a upravovat.

4.2 Popis modelu

Pomocí programu IGNITE jsem sestavil 2 modely elektricky poháněného vozidla. Jeden slouží pro zjištění maximálního dojezdu při jízdě podle jízdního cyklu. Druhý simuluje rozjezd při plně sešlápnutém plynovém pedálu. Modely jsou znázorněny na obrázku 11 a 12.



Obrázek 11 - Model elektromobilu pro jízdu podle jízdního cyklu



Obrázek 12 - Model elektromobilu pro simulaci rozjezdu

4.2.1 Jízdní cyklus

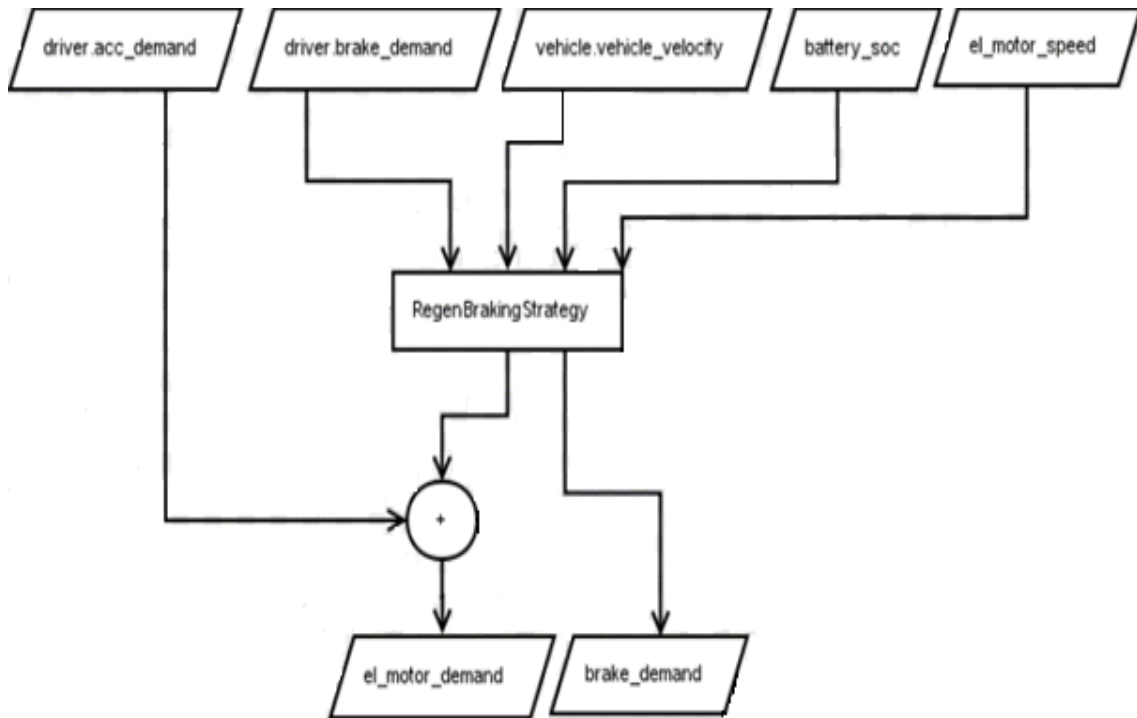
Jízdní cyklus představuje závislost polohy vozidla na čase. Tento objekt umožňuje uživateli vybrat buď to předdefinovaný jízdní cyklus, nebo lze nahrát cyklus ze souboru. V mém modelu používám cyklus WLTC 2. kategorie. Cyklus WLTC byl blíže popsán v kapitole 2.5.4. Zajímá mě celkový dojezd, proto při simulaci budou probíhat cykly bezprostředně po sobě. Jakmile úroveň nabití baterie klesne na 10 %, tak simulace končí.

4.2.2 CycleDriver

Tento objekt v modelu zastupuje řidiče. Poskytuje především signál zrychlení a brzdění na základě jízdního cyklu, který tvoří vstupní signál do tohoto objektu. Hodnoty v objektu musí být nastaveny tak, aby nebyly velké odchylky od jízdního cyklu.

4.2.3 EV kontrolér

EV kontrolér funguje jako kontrolní člen, který zajišťuje výměnu signálu mezi motorem, baterií a vozidlem. K zachycení regenerativního brzdění je využito RegenBrakingStrategy. Požadavek na elektrický motor je dán součtem požadavků na zrychlení řidiče a požadavků na regenerativní brzdění. Na následujícím obrázku je zobrazeno, jak jsou vedeny signály v tomto ovladači. Parametry ovladače jsem ponechal ve výchozím nastavení.



Obrázek 13 - Schéma vedení signálů EV kontrolér

4.2.4 Pneumatiky

Pro účely simulace byly zvoleny pneumatiky typu SimleTire. Tento typ pneumatik je pro většinu simulací jízdních cyklů vhodný, neboť může být ignorován prokluz kola a valivý odpor kola je úměrný normálové síle a rychlosti elektromobilu [29]. Na obrázcích 11 a 12 jsou pneumatiky označeny pomoci písmen *f* (front), *r* (rear), *l* (left), *r* (right).

Pro návrh jsem vybral rozměr pneumatik, které jsou často využívány u malých automobilů. Nastavované parametry pro pneumatiky jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 - Parametry pneumatiky

Typ	165/70 R14
Poloměr [mm]	293,5
Koef. valivého odporu [-]	0,015

Definovaný poloměr odpovídá danému typu pneumatiky. Koeficient valivého odporu byl zvolen 0,15, protože pro asfalt se hodnota tohoto koeficientu udává 0,01 – 0,02. [26] Zvolil jsem tedy průměr těchto hodnot.

4.2.5 Baterie

V kapitole 3 byly vybrány 3 různé baterie. Hodnoty parametrů baterií se liší podle toho, pro který motor jsou použity. Tyto hodnoty jsou uvedené v tabulce 17 v kapitole 4.3.

4.2.6 Elektromotor

V kapitole 3 byly vybrány 4 různé elektromotory. Parametry, které zadávám do programu IGNITE jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 - Parametry baterií

Označení	M1	M2	M3	M4
Výkon [kw]	11,5	12	14,5	21
Točivý moment [Nm]	35	57	80	95

4.2.7 Vozidlo

K simulaci byl použit objekt AdvancedVehicle. Na rozdíl od objektu BasicVehicle, tento objekt umožňuje připojit 2 nebo 4 kola k vozidlu. AdvancedVehicle vypočítává zatížení na základě akcelerace nebo zpomalení hmoty vozidla, brzděné síly, aerodynamického odporu vozidla, práce proti gravitaci v důsledku změny výškové polohy vozidla a připojeného závěsného vozidla.

Statické rozložení hmotnosti se automaticky vypočítá na základě zadaných vzdáleností těžiště od náprav. Dynamické rozložení hmotnosti se předpovídá vyvážením točivých momentů vytvářených aplikovanými silami. To znamená silami, které nepůsobí přímo přes těžiště. [29]

V tabulce 16 jsou uvedeny hodnoty parametrů, které byly zadány do programu.

Tabulka 16 - Hodnoty zadávané do bloku AdvancedVehicle

Hmotnost vozu [kg]	450 + hmotnost baterie
Čelní plocha [m ²]	2,064534
Hustota vzduchu [kg/m ³]	1,225
Přední náprava od T [m]	0,9335
Zadní náprava od T [m]	0,9335

4.3 Simulace

K simulaci v programu IGNITE využívám možnost parametrizace. To mi umožňuje nadefinovat několik kombinací motoru a baterií. V programu IGNITE jsou tyto kombinace zobrazeny jako Case 1, Case 2, atd. V mém případě mám vybrané 3 různé baterie a 4 elektromotory, to znamená, že možných kombinací je 12. Pro lepší přehlednost nebudu simulovat všech 12 kombinací najednou, ale vytvořím si tzv. Case set pro každý elektromotor. Poté se spustí 4 simulace, kde budou parametricky zadané hodnoty baterií. V simulaci také zohledňuji

hmotnost baterií, kterou vždy připočítávám k hmotnosti vozu. Kombinace jsou uvedené v tabulce 17.

Tabulka 17 - Parametrické zadání pro simulaci

Motor	Baterie	Elektromotor		Baterie		Hmotnost vozidla [kg]
		Výkon [kW]	Toč. moment [Nm]	Kapacita [Ah]	Napětí [V]	
M1	B1	11,5	35	100	59	477,2
	B2	11,5	35	135	48	495
	B3	11,5	35	150	48	494,25
M2	B1	12	57	100	48	472,1
	B2	12	57	135	48	495
	B3	12	57	150	48	494,25
M3	B1	14,5	80	100	59	477,2
	B2	14,5	80	135	48	495
	B3	14,5	80	150	48	494,25
M4	B1	21	95	100	74	484
	B2	21	95	135	74	525,9
	B3	21	95	150	74	517,85

5 Výsledky simulace

Výsledky simulace byly zpracovány v programu R – Post. Tento program nabízí velký počet různých grafů a dat ze simulace. Mě zajímá především dojezd a maximální rychlost vozidla na vybrané komponenty. Tyto výsledky v této kapitole zhodnotím a vyberu nejvhodnější kombinaci baterie a elektromotoru.

5.1 Popis programu R – Post

Program R – post je software od společnosti Ricardo s.r.o. Slouží především ke zpracování dat ze simulací (nejen z programu IGNITE, ale i dalších programů od Ricardo) v podobě grafů. R – Post nabízí standardní dvourozměrné grafy. Pomocí nástrojů v programu může uživatel tvořit vlastní grafy a dále tyto grafy může upravovat. Zpracované grafy a data se dále mohou vyexportovat v různých formátech pro další zpracování.

5.2 Dojezd vozidla

Výsledky simulací jsou interpretovány v maticích o velikosti 3 x 4, kde ve sloupcích jsou vybrané baterie označeny B1, B2, B3 a v řádcích jsou motory označeny M1, M2, M3, M4. Pro lepší přehlednost zde uvádím tabulku 18, kde jsou zobrazeny výkon motoru, napětí a kapacita baterie pro danou kombinaci. Ujetá vzdálenost je uvedena v tabulce 19. Značí vzdálenost v km, která byla ujeta z počátečního stavu baterie, který byl 100 %, až do stavu 10 %. V tabulce 20 jsou uvedeny ceny dané kombinace motoru a baterie. Následuje porovnání dojezdu a ceny jednotlivých kombinací, které je zobrazeno na obrázku 14, kde body v grafu představují jednotlivé kombinace motoru a baterie. Pro přehledné porovnání ještě uvádím tabulku 21, ve které je vypočítána cena za km dojezdu. Ta byla získána vydělením ceny dané kombinace dojezdem stejné kombinace.

Tabulka 18 - Základní parametry kombinací motoru a baterie

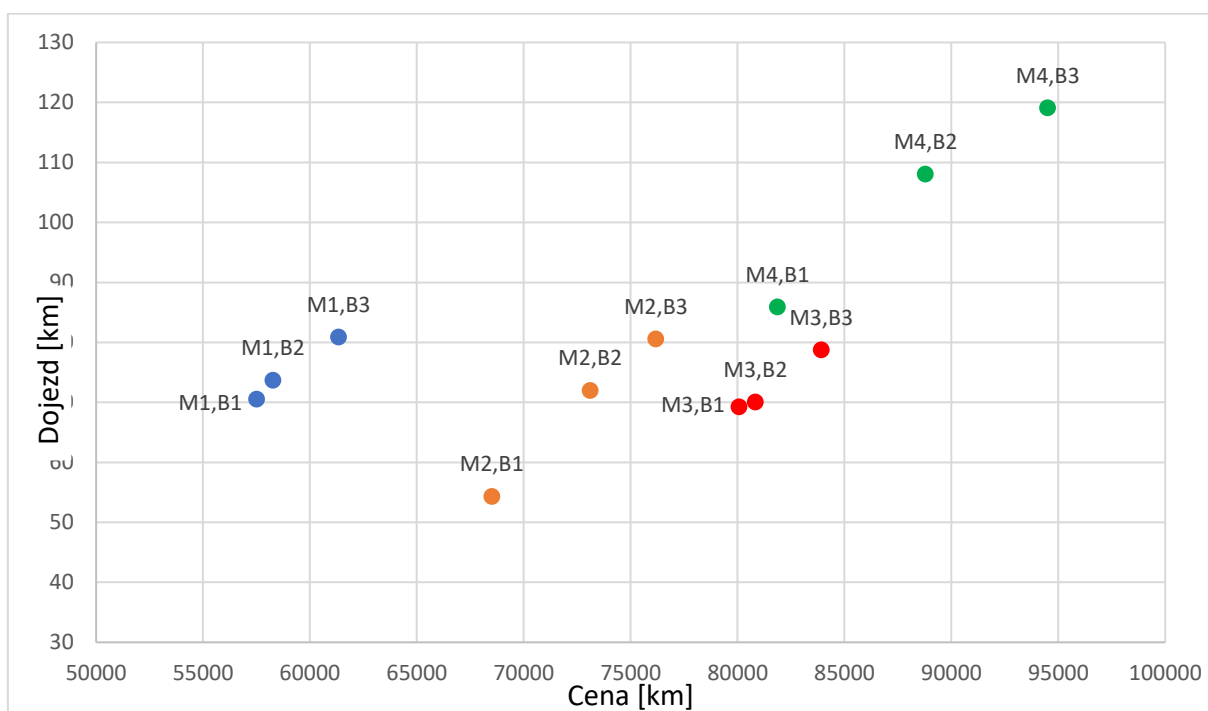
Parametry kombinací			
	B1	B2	B3
M1	11,5 kW; 59 V; 100 Ah	11,5 kW; 48 V; 135 Ah	11,5 kW; 48 V; 150 Ah
M2	12 kW; 48 V; 100 Ah	12 kW; 48 V; 135 Ah	12 kW; 48 V; 150 Ah
M3	14,5 kW; 59 V; 100 Ah	14,5 kW; 48 V; 135 Ah	14,5 kW; 48 V; 150 Ah
M4	21 kW; 72 V; 100 Ah	21 kW; 72 V; 135 Ah	21 kW; 72 V; 150 Ah

Tabulka 19 - Dojezd elektromobilu pro možné kombinace motoru a baterie

Dojezd [km]			
	B1	B2	B3
M1	70,5518	73,7031	80,9111
M2	54,3330	71,9688	80,5831
M3	69,2786	70,0726	78,7794
M4	85,9223	108,0865	119,1021

Tabulka 20 - Ceny jednotlivých kombinací motoru a baterie

Cena [Kč]			
	B1	B2	B3
M1	57503	58268	61343
M2	68505	73105	76180
M3	80070	80835	83910
M4	81861	88788	94503



Obrázek 14 - Porovnání kombinací z hlediska ceny a dojezdu

Tabulka 21 - Cena za km dojezdu jednotlivých kombinací motoru a baterie

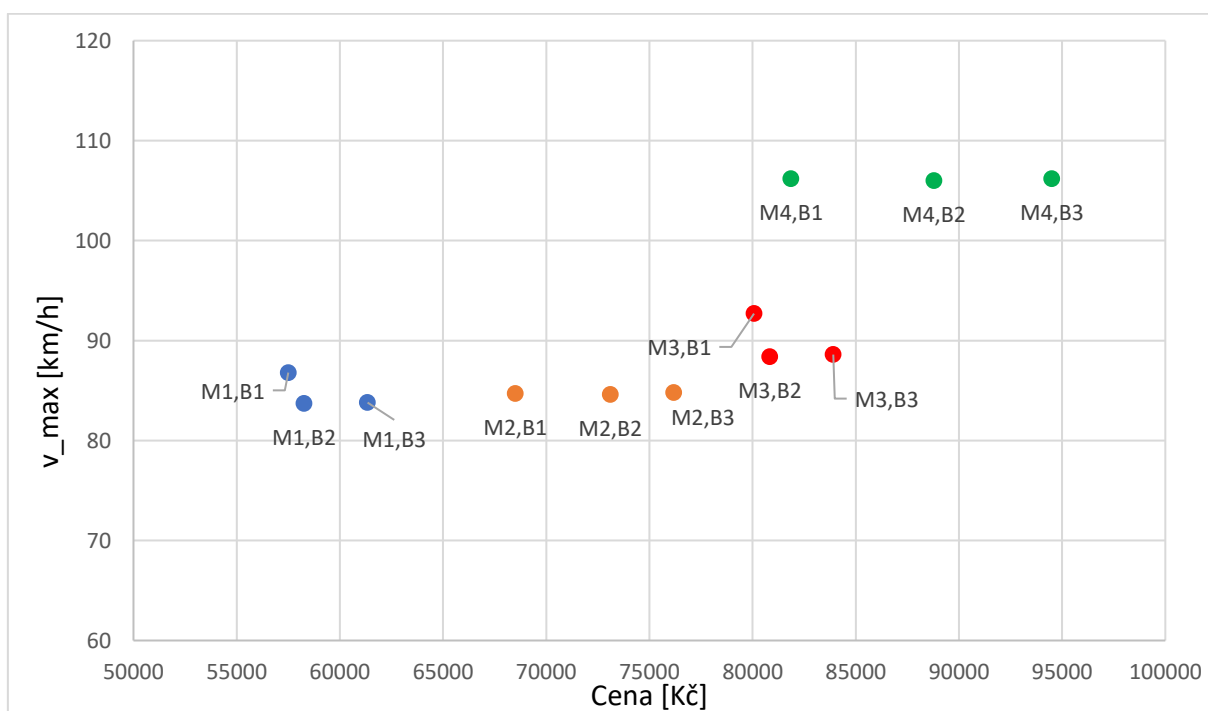
Cena za km dojezdu [Kč]			
	B1	B2	B3
M1	815	791	758
M2	1261	1016	945
M3	1156	1154	1065
M4	953	821	793

5.3 Rozjezd vozidla

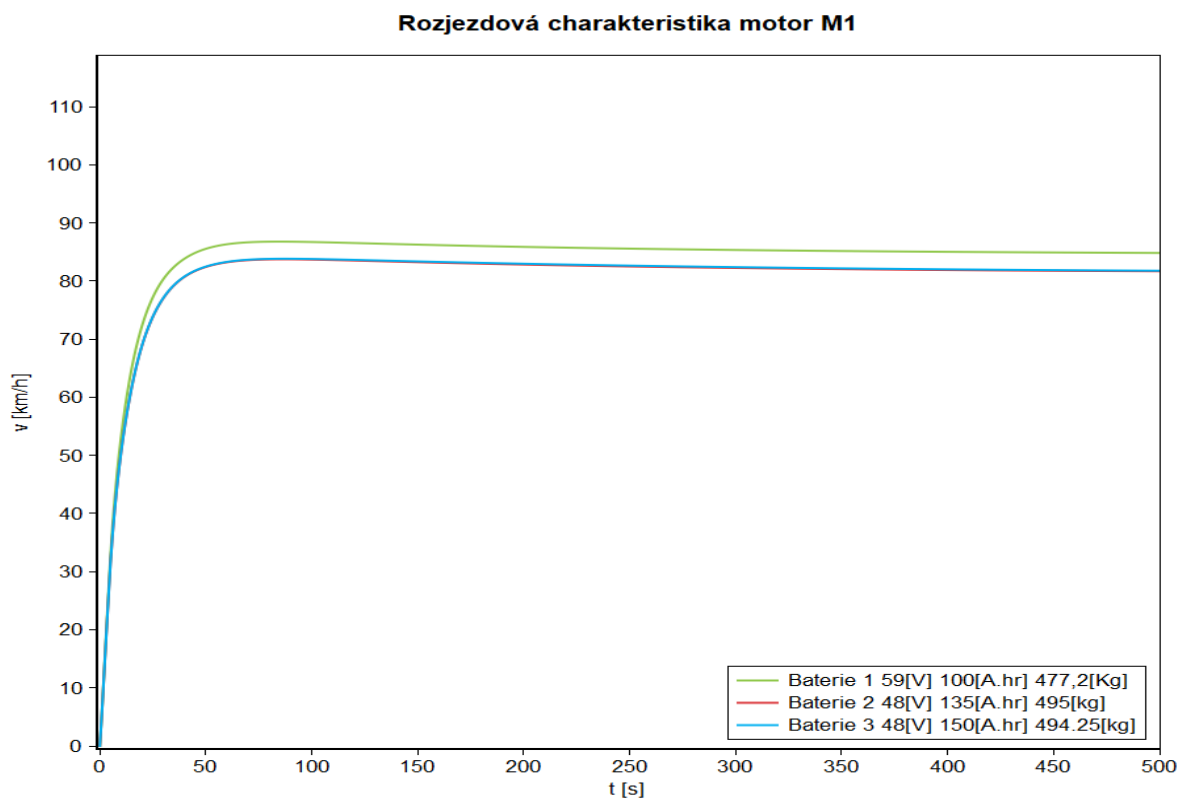
Při této simulaci se vozidlo rozjelo s plně sešlápnutým plynovým pedálem. Cílem bylo získat rozjezdovou charakteristiku elektromobilu, ze které následně byla zjištěna maximální rychlost navrhovaného vozidla. Aby bylo možné dosáhnout maximální rychlosti, byl počáteční stav baterie nastaven na 100 %. Maximální rychlost je uvedena v tabulce 22. K této tabulce byl vytvořen bodový graf (obrázek 15), kde na ose x je zobrazena cena a na ose y je maximální rychlost. Rozjezdová charakteristika je zobrazena na obrázku 16. Tato charakteristika má pro všechny simulované kombinace v podstatě stejný průběh, proto zde uvádím jen charakteristiky pro motor 1.

Tabulka 22 - Maximální rychlost vozidla pro možné kombinace motoru a baterii

Max rychlost [km/h]			
	B1	B2	B3
M1	86,8	83,7	83,8
M2	84,7	84,6	84,8
M3	92,7	88,4	88,6
M4	106,2	106	106,2



Obrázek 15 - Porovnání kombinací z hlediska max rychlosti a ceny



Obrázek 16 - Rozjezdová charakteristika pro motor M1

5.4 Vyhodnocení

Největší dojezd vozidla nabízí motor M4, tedy motor Motenergy 1302. V kombinaci s baterií B3 (72 V, 150 Ah) dosahuje dojezdu 119 km. Na druhou stranu se jedná o variantu, která je nejdražší ze všech možných kombinací. Nejhorší výsledky měly motory M2 a M3, tedy motor ISKRA a motor HPVES. Kombinace s těmito motory dosahují podobných dojezdů jako motor M1 (Motenergy ME1003), ale jejich cena je vyšší. Motor M2 v kombinaci s baterií B1 (48 V, 100 Ah) dosahuje nejmenšího dojezdu ze všech, a to 54 km. Naopak motor M1 dopadl dobře, protože dosahuje uspokojivého dojezdu, například v kombinaci s baterií B3 (48 V, 150 Ah) je dojezd téměř 81 km. Navíc všechny 3 kombinace baterií s motorem M1 vycházejí nejlevněji.

Zajímavé srovnání nabízí tabulka 21. V té je zobrazena cena za km dojezdu. Nejlepší kombinací v tomto porovnání je M1, B3, kde za jeden km dojezdu zaplatíme 758 Kč. Z tabulky dále plyne, že motory M2 a M3 jsou nejméně výhodné. Motor M3 si nevede špatně v kombinaci s nejkapacitnější baterií B3.

Z hlediska maximální rychlosti jsou na tom lépe varianty s vyšším napětím baterie, to znamená varianty s motorem M4, tento motor také nabízí největší výkon 21 kW. Vozidlo s tímto motorem dosahuje rychlosti 106 km/h. Naopak nejmenší maximální rychlosti (84 km/h) dosahuje nejméně výkonný motor M1 (11,5 kW).

Pokud výsledky ze simulací porovnáme s průzkumem malých městských elektromobilů provedeným v kapitole 3, tak zjistíme, že navrhované vozidlo dosahuje podobných výsledků jako Renault Twizy a E.go Life. Renault Twizy má dojezd 100 km, ovšem podle NEDC cyklu. Při návrhu byl použit cyklus WLTC, který je náročnější. Malý Renault by zcela určitě podle cyklu WLTC dosahoval nižšího dojezdu. Dá se předpokládat, že dojezd by podle tohoto náročnějšího cyklu byl podobný jako dojezd navrhovaného vozidla ve variantě s motorem M1. Vozidlo E.go Life dosahuje dojezdu 112 km. Zde se mi nepodařilo dohledat, podle jakého cyklu byl dojezd měřený. Ale vzhledem k energii baterie, která je u tohoto vozidla 12,1 kWh, odhaduji, že se jedná o cyklus WLTC. To by pak znamenalo, že podobného dojezdu dosahuje navrhovaný elektromobil pouze ve variantách s motorem M4. Z hlediska maximální rychlosti se navrhovaný elektromobil může srovnávat pouze s Renaultem Twizy, který má maximální rychlost 80 km/h.

Pro uskutečněný návrh pohonu malého městského elektrického vozidla vybírám jako nejvhodnější variantu kombinaci M1, B3. Vozidlo při této variantě dosahuje dojezdu 81 km, maximální rychlost činí 84 km/h a výsledná cena komponentů je 61 343 Kč, což vychází nejméně z hlediska ceny za km dojezdu. Dojezd vozidla 81 km hodnotím jako dostačující pro studentský carsharing v Praze. Taktéž si myslím, že dostačující je i maximální rychlost 84 km/h. Vozidlo je totiž určeno pouze pro městský provoz. Při této variantě by vozidlo mělo výkon 11,5 kW, parametry baterie by byly 48 V, 150 Ah a 7,1 kWh. Celková hmotnost vozidla by byla 494,25 kg.

Pro zvýšení dojezdu vozidla by bylo nutné použití více bateriových článků. Bylo by vhodné přidat články paralelně, aby byla zvednuta kapacita baterie. Pro zvýšení maximální rychlosti by bylo nutné zvýšit výkon. Například by se daly použít motory 2. Jeden umístěný na přední nápravě a druhý na zadní. Tomu by se pak musely přizpůsobit také baterie, u kterých by bylo vhodné zvýšit napětí přidáním dalších článků do série.

6 Závěr

Vypracovaná bakalářská práce navrhuje elektrický pohon malého městského vozidla. Při návrhu jsem vycházel z aktuálně vyráběných malých elektromobilů. Zejména byl brán zřetel, aby návrh odpovídal nejmodernějším trendům v oblasti elektromobility.

V úvodu této práce byly uvedeny důvody, proč elektricky poháněná vozidla mohou být v budoucnu řešením individuální automobilové dopravy z hlediska životního prostředí. Také zde bylo popsáno, jak funguje carsharing, pro který je vozidlo navrhováno.

Následně byly popsány druhy elektricky poháněných vozidel a architektura pohonu elektromobilu využívající baterie. Poté jsou vysvětleny důležité parametry baterií, protože pro návrh pohonu je důležité vědět, jak baterie fungují, a co vlastně hodnoty udávané výrobcem znamenají. Byla provedena studie jednotlivých typů baterií podle materiálů, kterými jsou tvořeny. Blíže jsou zde vysvětleny olověné, niklové, lithium-iontové a také speciální akumulátory. Parametry těchto druhů baterií jsou pak přehledně porovnány. Několik stránek této práce je věnováno elektromotorům. Jsou zde zahrnuty elektromotory, které se využívají v elektromobilech nejčastěji. Byl kladen důraz na vysvětlení principu funkce jednotlivých druhů a rozdílů mezi nimi. Jedna kapitola byla věnována legislativním požadavkům na elektromobily, zvláště pak jízdním cyklům, podle kterých jsou vozidla testována. Bylo důležité vysvětlit cyklus WLTC, neboť právě podle tohoto cyklu byla provedena simulace pro zjištění dojezdu navrhovaného městského elektromobilu.

Stěžejní částí této bakalářské práce byl průzkum trhu malých městských elektrických vozidel. Pro návrh pohonu jsou důležité rozměrové a hmotnostní informace o vozidle, tyto informace bylo potřeba určit, aby byly následně provedené simulace, co nejpřesnější. S kolegou, který se zabývá návrhem podvozku tohoto vozidla bylo dohodnuto, že rozměrově navrhovaný elektromobil odpovídá Smartu ForTwo. Rozměrové vlastnosti tedy byly vzaty podle tohoto vozidla. Po hmotnostní stránce byla určena hmotnost vozidla 450 kg bez baterie. Tato hodnota přibližně odpovídala Renaultu Twizy. Proto bylo při hledání vhodných komponentů pro pohon přihlíženo k výkonnostním parametrům tohoto malého Renaultu. (Pokud budou k dispozici nová a přesná data o navrhovaném vozidle, tak budou jen změněny parametry modelu v programu IGNITE a spuštěny nové simulace pro změněný model). Následně byl uskutečněn průzkum trhu elektromotorů a baterií. Při tomto průzkumu byla kontaktována řada firem nabízející tyto komponenty. Důraz byl kladen především na cenu a dostupnost. Na základě tohoto průzkumu byly vybrány nejvhodnější baterie a elektromotory pro návrh pohonu. Celkem byly vybrány 3 různé baterie a 4 elektromotory.

Po vybrání vhodných komponentů následovala část práce, kde byl využíván program IGNITE. Aby bylo možné provést simulace, musel být nejdříve sestaven model pohonu v tomto

programu. Jednotlivé objekty v modelu byly nadefinovány podle parametrů zjištěných při průzkumu trhu. Celkem bylo nadefinováno 12 různých variací baterie a elektromotoru. Modely byly sestaveny 2, které se lišily v jízdním cyklu. Pro simulaci dojezdu byl použit cyklus WLTC. Při 2. simulaci se nechalo vozidlo rozjet s plně sešlápnutým plynovým pedálem. Výsledkem této simulace byla rozjezdová charakteristika, ze které byla následně určena maximální rychlost.

Následně byly sestaveny matice, ve kterých jsou interpretovány výsledky provedených simulací. V maticích jsou uvedeny data pro všech 12 možných kombinací baterie a elektromotoru. Jednotlivé kombinace byly mezi sebou porovnány podle maximálního dojezdu, celkové ceny, ceny za km dojezdu a podle maximální dosažené rychlosti při rozjezdu. Na základě těchto porovnaní byla určena nejvhodnější varianta pro pohon navrhovaného malého městského elektrického vozidla, která je M1, B3 (motor Motenergy ME1003 a baterie CALB 150Ah). Při této variantě by hmotnost vozidla byla 494,25 kg, výkon motoru 11,5 kW a parametry baterie by byly 48 V, 150 Ah a 7,1 kWh.

Seznam použitých zdrojů

- [1] fDrive. *Benzin vs. elektřina: o čisté mobilitě s Ivanem Indráčkem a Lukášem Hatašem*. [online]. 1.11.2019 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/benzin-vs-elekrina-o-ciste-mobilite-s-ivanem-indrackem-a-lukasem-hatasem-4500>
- [2] Garaz.cz. *Srovnání energetické ztráty elektromobilů a běžných aut*. [online]. 10.9.2018 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/srovnani-energeticke-ztraty-elektromobilu-a-beznych-aut-21000070>
- [3] ZITY, *Electric carsharing in Madrid* [online] [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.ferrovial.com/en/business/projects/zity-electric-carsharing-in-madrid/>
- [4] MELNIČÁK, Leonard. *Systém schvalování elektromobilů* [online]. 2017 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72911/F6D-BP-2017-Melnicak-Leonard-System%20schvalovani%20elektromobilu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] SUN, Xiaoli, Zhengguo LI, Xiaolin WANG and Chengjiang LI. *Technology Development of Electric Vehicles* [online]. 2019 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/90/htm>
- [6] Volkswagen Group of America, Inc. *Basics of Electric Vehicles Design and Function* [online]. 2013 [cit. 2020-06-26] Dostupné z: https://vwcampersite.files.wordpress.com/2015/01/ssp_820233-electric-drives_2013.pdf
- [7] Hybrid.cz. *Elektromotor v náboji kola: uchytí se jako flexibilní a levný pohon elektromobilů?* [online]. říjen 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/elektromotor-v-naboji-kola-uchyti-se-jako-flexibilni-levny-pohon-elektromobilu>
- [8] LARMINIE, James. a John LOWRY. *Electric vehicle technology explained*. Second Edition. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons Ltd, ©2012. ISBN 978-1-119-94273-3.
- [9] MOK, Brain. *Types of Batteries Used for Electric Vehicles*. [online]. 6. říjen 2017 [cit. 2020-06.27]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/mok2/>
- [10] Battery university. *Advantages & Limitations of the Lithium-ion Battery*. [online] [cit 2020-07-01]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery
- [11] Battery university. *Understanding lithium-ion*. [online] [cit. 2020-07-01] Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion

- [12] Battery university. *Is Li-ion the Solution for the Electric Vehicle?* [online] [cit. 2020-07-01]
Dostupné z:
https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_li_ion_the_solution_for_the_electric_vehicle
- [13] How stuff works. *How Does a Brushless Electric Motor Work?* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/brushless-motor.htm>
- [14] Research Gate. *Diagrams of brushed and brushless DC motors.* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Diagrams-of-brushed-and-brushless-DC-motors10_fig5_315337631
- [15] KOŠÍK, Michal a Pavel SKAROLEK. *Trakční vlastnosti elektromobilu - výkony a účinnosti.* [online]. 16.11.2017 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z:
http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/B1M14EPT/EPT_%C3%BAloha5_2017_18_elektromobil.pdf
- [16] Sew-eurodrive. *Třířázové motory, asynchronní motory.* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: https://www.sew-eurodrive.cz/vyroby/motory/trifazove_motory/drehstrommotoren_1.html
- [17] Quora. *What is an induction motor and a DC motor?* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-an-induction-motor-and-a-DC-motor>
- [18] BOUIABADY, Mohammad Mahdi, Aliakbar Damaki ALIABAD a Ebrahim AMIRI. *Switched Reluctance Motor Topologies.* [online]. 21.6.2017 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/switched-reluctance-motor-concept-control-and-applications/switched-reluctance-motor-topologies-a-comprehensive-review>
- [19] Motion Control Tips. *How do switched reluctance motors differ from stepper motors.* [online]. 1.9.2017 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/how-do-switched-reluctance-motors-differ-from-stepper-motors/>
- [20] EUR-Lex *Přístup k právu Evropské unie* [online]. 2014 Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/85/oj>
- [21] EUR-Lex *Přístup k právu Evropské unie* [online]. 2016. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/100/2016-01-29>
- [22] EUR-Lex *Přístup k právu Evropské unie* [online]. 2012. Dostupné z: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1578353146257&uri=CELEX:42012X0526\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1578353146257&uri=CELEX:42012X0526(01))

- [23] DUSIL, Tomáš. *Nový homologační emisní test WLTP: opravdu znamená konec lhání?* [online]. 2017 Dostupné z: <https://www.auto.cz/novy-homologacni-emisni-test-wltp-opravdu-znamená-konec-lhani-110305>
- [24] EUR-Lex *Přístup k právu Evropské unie*. [online]. 2019 Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/2019-01-01>
- [25] Drawingdatabase.com. *Smart Fortwo Blueprint* [online]. 2014 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://drawingdatabase.com/smart-fortwo/>
- [26] Autolexicon.net *Odpor valivý* [online] [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/odpor-valivy/>
- [27] Control engeneering. *Střídavé motory s permanentními magnety*. [online]. březen 2010 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/stridave-motory-s-permanentnimi-magnety/>
- [28] Transportpolicy.net. *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) | Transport Policy*. [online] [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://www.transportpolicy.net/standard/international-light-duty-worldwide-harmonized-light-vehicles-test-procedure-wltp/>
- [29] RICARDO Software, *IGNITE help* [Online] Dostupne z: <https://docs.ricardo-ignite.com>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Základní schéma elektromobilu s baterií [5].....	13
Obrázek 2 - Porovnání Li-ion baterií [12].....	19
Obrázek 3- Porovnání kartáčového a bezkartáčového DC motoru [14].....	22
Obrázek 4 - Schéma indukčního motoru [17]	23
Obrázek 5 - Schéma reluktančního motoru [18].....	24
Obrázek 6 - NEDC cyklus [23]	28
Obrázek 7 - WLTC cyklus 3. kategorie [23].....	28
Obrázek 8 - Čelní plocha Smartu Fortwo	32
Obrázek 9 - Rozměry Smart Fortwo [25].....	32
Obrázek 10 - Model mód v programu IGNITE	38
Obrázek 11 - Model elektromobilu pro jízdu podle jízdního cyklu	39
Obrázek 12 - Model elektromobilu pro simulaci rozjezdu	40
Obrázek 13 - Schéma vedení signálů EV kontrolér	41
Obrázek 14 - Porovnání kombinací z hlediska ceny a dojezdu	45
Obrázek 15 - Porovnání kombinací z hlediska max rychlosti a ceny	46
Obrázek 16 - Rozjezdová charakteristika pro motor M1.....	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Technické specifikace jednotlivých typů baterií.....	20
Tabulka 2 - Účinnost jednotlivých typů motorů.....	25
Tabulka 3 - Technické specifikace malých městských elektromobilů	30
Tabulka 4 - Technické specifikace Motenergy motor.....	33
Tabulka 5 - Technické specifikace ISKRA motoru.....	33
Tabulka 6 - Technické specifikace HPEVS motor	33
Tabulka 7 - Technické specifikace Motenergy SPM motor	34
Tabulka 8 - Technické specifikace vybraných motorů	34
Tabulka 9 - Technické specifikace vybraných baterií	35
Tabulka 10 - Konfigurace baterií k motoru M1.....	36
Tabulka 11 -Konfigurace baterií k motoru M2	36
Tabulka 12 - Konfigurace baterií k motoru M3.....	36
Tabulka 13 - Konfigurace baterií k motoru M4.....	37
Tabulka 14 - Parametry pneumatiky	41
Tabulka 15 - Parametry baterií.....	42
Tabulka 16 - Hodnoty zadávané do bloku AdvancedVehicle.....	42
Tabulka 17 - Parametrické zadání pro simulaci.....	43
Tabulka 18 - Základní parametry kombinací motoru a baterie.....	44
Tabulka 19 - Dojezd elektromobilu pro možné kombinace motoru a baterie	44
Tabulka 20 - Ceny jednotlivých kombinací motoru a baterie	45
Tabulka 21 - Cena za km dojezdu jednotlivých kombinací motoru a baterie	45
Tabulka 22 - Maximální rychlost vozidla pro možné kombinace motoru a baterií	46