



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA DOPRAVNÍ

Aleš Novák

**Návrh hnacího ústrojí s elektromotorem v kolech pro
malý sdílený elektromobil**

Bakalářská práce

2021



K616.....Ústav dopravních prostředků

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Aleš Novák

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – ITS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Návrh hnacího ústrojí s elektromotorem v kolech pro malý sdílený elektromobil**

Název tématu (anglicky): In wheel electric motor powertrain design for a small carsharing EV

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Shrňte důvody pro využívání elektromobilů (EV) v rámci carsharingu.
- Charakterizujte pohon vozidla s elektromotory umístěnými v kolech a uveďte jeho výhody.
- Proveďte průzkum současného trhu EV s elektromotory v kolech.
- Ověřte dostupnost komponent pohonu s elektromotorem v kolech.
- Na základě zjištěných informací navrhnete vhodnou sadu architektur pohonu s motorem v kolech a tyto ověřte v rámci SW simulací.
- Představte dostupné architektury s jejich hlavními charakteristikami a cenovými odhady, zvolte vhodnou architekturu pro systém studentských sdílených EV v Praze.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích 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, Ph.D.**
doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **22. června 2020**
(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: **1. prosince 2021**
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.

Aleš Novák
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....12. srpna 2021

Poděkování

Na úvod mé práce bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro její vypracování. Zvláště pak děkuji panu Ing. Dmitrymu Rozhdestvenskiymu, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu jejího zpracování. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr bakalářského 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 dodržování etických principů při 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 některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 1. prosince 2021

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Návrh hnacího ústrojí s elektromotorem v kolech pro malý
sdílený elektromobil

bakalářská práce

Listopad 2021

Aleš Novák

ABSTRAKT

Cílem této práce je vytvořit model, simulovat a porovnat různé designy hnacích ústrojí pro malý sdílený elektromobil za použití technologie elektromotorů v kolech na základě průzkumu trhu dostupných komponentů. Vytvořený model může sloužit jako nástroj pro simulace elektromobilů s motory v kolech různých parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Motor v kole, elektromobil, carsharing, pohon, elektromotor, modelování, simulace

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of transportation sciences

In wheel electric motor powertrain design for a small carsharing
EV

bachelors thesis

November 2021

Aleš Novák

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create a model, simulate and compare different powertrain designs for small carsharing EV using in wheel technology based on market research of available components. Created model can be used as a tool for simulating electric vehicles of different parameters.

KEY WORDS

In wheel motor, elektromobile, carsharing, powertrain, electric motor, modeling, simulation

Obsah

Seznam použitých zkratek	8
1 Úvod	9
1.1 Proč elektromobil	9
1.2 Carsharing	10
2 Legislativa	10
2.1 Jízdní cykly	11
2.1.1 NEDC (New European Driving Cycle): nový evropský jízdní cyklus	11
2.1.2 WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure):	11
3 Druhy a technologie elektromobilů	13
3.1 Baterie	13
3.2 Elektromotor	15
3.2.1 Kartáčový stejnosměrný motor	15
3.2.2 Bezkartáčový stejnosměrný motor	17
3.2.3 Spínaný reluktanční motor	18
3.2.4 Indukční motor	19
3.2.5 Shrnutí	19
3.2.6 Účinnost stejnosměrných motorů	20
3.2.7 Ztráty a velikost elektromotorů	22
3.2.8 Elektromotory jako brzdy	23
3.2.9 Elektromotor v kole	23
3.3 Elektromobil s baterií (BEV)	26
3.3.1 BEV s centrálním elektromotorem	27
3.3.2 BEV s motory v kolech	27
4 Průzkum trhu	28
4.1 Malé elektromobily	28
4.1.1 Renault Zoe	28
4.1.2 Opel Corsa-e	28

4.1.3	BMW i3.....	29
4.1.4	Smart EQ fortwo	29
4.1.5	Aixam E City Pack	29
4.1.6	Renault Twizy	29
4.1.7	Citroen AMI	29
4.1.8	Souhrn.....	29
4.2	Vozidla s elektromotorem v kolech	30
4.2.1	Luka EV in-wheel.....	30
4.2.2	Lightyear one.....	30
4.2.3	Lordstown Endurance.....	31
4.3	Elektromotory	31
4.3.1	Elaphe	31
4.3.2	Protean.....	32
4.3.3	QS motors	33
4.4	Baterie	33
5	Návrh vozidla.....	34
5.1	Motor	34
5.2	Baterie	34
5.2.1	Zapojení baterií.....	34
5.3	Počet motorů	34
5.4	Rozměry, hmotnost a těžiště vozidla.....	35
5.5	Program IGNITE.....	36
5.5.1	Jízdní cyklus.....	38
5.5.2	Cycle driver	38
5.5.3	Electric vehicle controller	38
5.5.4	Kola	38
5.5.5	Baterie.....	38
5.5.6	DC-DC convertor	39
5.5.7	Elektromotor	39

5.5.8	Vozidlo.....	40
5.6	Simulace.....	41
6	Výsledky	41
6.1	Dojezd vozidel	41
6.2	Spotřeba vozidel.....	43
6.3	Rozjezdová charakteristika	44
6.4	Vyhodnocení.....	45
7	Závěr	46
	Použité zdroje.....	48
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek	55
	Sezam grafů	56
	Seznam rovnic.....	57

Seznam použitých zkratek

ABS	anti-lock brake systém
AC	Střídavý proud
AWD	pohon všech kol
BEV	Elektromobil s baterií
BMS	battery management systém
DC	Stejnoseměrný proud
EPA	United States Environmental Protection Agency
FWD	pohon předních kol
Mvoz	hmotnost vozidla
NEDC	New European Driving Cycle
PHEV	Plug-in hybrid
PWr	počet kilowatt na tunu vozidla
RWD	pohon zadních kol
WLTC	Worldwide harmonised Light duty vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Procedure

1 Úvod

Toto téma bakalářské práce jsem si vybral, protože se zajímám o budoucnost osobní silniční dopravy a o životní prostředí.

V této práci budu navrhovat elektrické sdílené vozidlo pro studenty v Praze s pohonem v kolech. Provedu analýzu současného trhu s komponenty pro malá elektrická vozidla a podle toho navrhnu vozidlo v programu IGNITE. V programu poté provedu simulace a dle nich budu posuzovat nejvhodnější komponenty.

Budu se zabývat elektromobilem obecně. Dopad elektromobility na životní prostředí v porovnání s automobilem se spalovacím motorem a přínos carsharingu pro uživatele a pro město. Dále popíšu různé architektury elektromobilů se zaměřením na výhody architektury s pohonem v kolech.

Následuje průzkum současného trhu malých elektrických vozidel. Vyhledání vhodných komponent pro elektromobil s pohonem v kolech a porovnání parametrů a cen komponent od různých výrobců. Na základě této kapitoly vyberu komponenty, které použiji ve své praktické části.

V praktické části navrhnu model pohonu v programu IGNITE. Budu porovnávat všechny různé kombinace vybraných komponent z předchozí kapitoly na základě dojezdu, rychlosti nabíjení, maximální rychlosti vozidla a dojezdové vzdálenosti na jedno nabití.

Závěrem popíšu výsledky simulací pomocí matic a grafů. Na základě analýzy vyberu nejvhodnější variantu a navrhnu úpravy dostupných komponent pro zlepšení klíčových charakteristik vozidla.

1.1 Proč elektromobil

Důvodem elektromobility je především celosvětová snaha o zpomalení globálního oteplování. Doprava za rok 2020 vyprodukovala světově $7,3 \cdot 10^9$ tun oxidu uhličitého do atmosféry, což jí řadí z hlediska znečištění na druhé místo po výrobě elektrické a tepelné energie. 41 % z toho vyprodukovala právě osobní silniční doprava [2], [3]. V Evropské Unii zastupuje doprava 25 % všech vyprodukovaných skleníkových plynů. [7]

Elektromobily jsou z hlediska emisí menší zátěží, především díky vyšší efektivitě elektromotorů. Elektromotory dosahují účinnosti kolem 77 % v převodu energie z elektrické sítě až k jejímu využití na kolech. Účinnost běžných automobilů se pohybuje mezi 12 % a 30 %. [4] Produkce skleníkových plynů u elektromobilů záleží ale především na způsobu výroby dané energie. Podíl obnovitelných zdrojů v elektrické síti se však stále zvyšuje

především díky zelené dohodě pro Evropu [5], a tedy elektromobily jsou oproti konvenčním automobilům s postupem času čím dál menší zátěží pro životní prostředí.

Z těchto, ale i jiných důvodů je elektromobilita dlouhodobě považována za budoucnost osobní dopravy ve městech, ale i mimo ně. Elektromobily jsou již dnes využívány ve velké míře například na letištích, golfových hřištích nebo jako vozítka pro invalidy. S rostoucí efektivitou baterií jak z hlediska kapacity, tak rychlosti nabíjení se v posledních letech dostávají elektromobily i na silnice. Průkopníkem v tomto ohledu byla především automobilka Tesla, ale dnes prakticky neexistuje automobilový výrobce, který by nenabízel elektrickou variantu alespoň některých svých modelů. Tento trend pokračuje i nadále, největší evropský výrobce automobilů Volkswagen Group například představil strategii, podle které bude do roku 2030 50 % všech vyrobených vozidel poháněno elektromotory a do roku 2040 téměř 100 % automobilů by mělo být bez emisí. Do roku 2050 plánuje pak celá skupina být klimaticky neutrální. [8]

Elektromobily jsou prozatím dražší variantou oproti klasickým automobilům na fosilní paliva, ale s nepolevujícími investicemi do oblasti vývoje a výroby baterií se každým dnem exponenciálně snižují náklady na jejich výrobu a zvyšuje kapacita i rychlost nabíjení [6].

1.2 Carsharing

Podstata carsharingu je sdílení aut více lidmi. Existuje několik firem nabízejících tuto službu především v Praze a ve velkých městech ve světě. Sdružuje výhody individuální a hromadné dopravy. Lidé nemusí vlastnit vlastní vozidla a nemají tedy náklady spojené s jeho údržbou či pořízením, zároveň se nemusí řídit jízdními řády, či rozmístěním zastávek. Automobil mohou nechat kdekoliv v rámci předdefinované zóny a jakmile cestu ukončí, je možné, aby elektromobil využil někdo jiný. Snižuje se tak nároky na parkovací plochy ve městech. Vozidlo navržené v této práci bude sloužit především pro studenty fakulty dopravní pro přejíždění mezi různými budovami fakulty. [20]

2 Legislativa

Evropská unie plánuje zákaz výroby aut se spalovacími motory do roku 2035. Tento krok je součástí Zelené dohody pro Evropu, která má za cíl nulové emise do roku 2050. Výsledkem této dohody by mělo být 30 milionů aut bez emisí v provozu do roku 2030 a do roku 2050 by již téměř všechny automobily, dodávky, autobusy i těžká technika a nákladní vozy měly být bez emisí. [1]

V České republice je aktuálně registrováno více než 6000 elektromobilů, z toho 3300 se prodalo v roce 2020 a to především díky investicím do rozšíření sítě dobíjecích stanic. „Na výstavbu dobíjecí a plnicí infrastruktury včetně nákupu vozidel na alternativní pohon by v

letech 2021 až 2027 mělo jít nejméně 16,45 mld. Kč. A to z evropských fondů i z národních zdrojů v gesci Ministerstva průmyslu a obchodu, Ministerstva dopravy, Ministerstva pro místní rozvoj či Ministerstva životního prostředí.“[9]

V Evropské unii je Česká republika zatím pod průměrem z hlediska podílu prodaných elektrických vozidel. Ve druhém čtvrtletí roku 2021 bylo v Evropské unii prodáno 7,5 % Elektromobilů s baterií (BEV) a 8,4 % plug-in hybridů (PHEV). V České republice je to pak 1,1 % BEV a 2 % PHEV. [11]

Tento rozdíl je dán především nízkou mírou státní podpory elektromobility. Stát v současné době neposkytuje žádné daňové úlevy ani dotace na nákup elektromobilů. Soustředí se především na rozvoj sítě dobíjecích stanic. Majitelé elektromobilů a plug-in hybridů s emisemi pod 50 g CO₂/km v Praze mají pak parkování na tzv. modrých zónách zdarma. Například v Německu a Nizozemsku je naopak dotace na koupi elektromobilu až 9000 eur, což je v přepočtu 230 000 korun. I přes to se očekává v České republice růst prodeje elektromobilů. [12], [13]

2.1 Jízdní cykly

Aby bylo možné osobní automobily uvést na trh, musí splnit řadu testů. Testy posuzující spotřebu paliva, emise CO₂ a znečišťující látky se provádějí v laboratoři a vycházejí z konkrétních jízdních cyklů.

Tyto testy jsou standardizované a umožňují porovnávat různé automobily.

1. září 2018 vstoupil v platnost nový celosvětový harmonizovaný zkušební postup pro lehké osobní automobily (WLTP - Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Procedure), který postupně nahradí dosavadní postup NEDC (New European Driving Cycle) v Evropě. [19]

2.1.1 NEDC (New European Driving Cycle): nový evropský jízdní cyklus

„Dosud používaný Evropský jízdní cyklus byl využíván pro měření spotřeby paliva a emisí osobních a lehkých užitkových vozidel. První Evropský jízdní cyklus vstoupil v platnost v roce 1970 a týkal se městského provozu. V roce 1992 byl rozšířen o mimoměstský provoz a od roku 1997 byl využíván pro měření spotřeby paliva a emisí CO₂. Složení tohoto testu však již neodpovídá současným stylům jízdy a vzdálenostem ujetým na různých typech vozovek. Průměrná rychlost v testu NEDC činí jen 34 km/h, zrychlení je malé a nejvyšší rychlost dosahuje pouze 120 km/h.“ [17]

2.1.2 WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure):

„WLTP využívá Nový celosvětový harmonizovaný zkušební cyklus lehkých vozidel (WLTC) pro měření spotřeby paliva, emisí CO₂ a znečišťujících látek osobních a lehkých užitkových

vozidel. Cílem nového postupu je poskytnout zákazníkům realističtější údaje, které lépe odrážejí každodenní používání vozidla.“ [17]

Nová metodika se používá pouze pro vozidla s hmotností pod 2 610 kg, jejichž homologace probíhá podle postupu pro malá vozidla. Při tomto postupu se testuje celé vozidlo.

Těžších vozidel se tato úprava zatím netýká. Jsou homologována pomocí postupu pro těžká vozidla, při němž se testuje pouze motor. [21]

Nový postup WLTP se vyznačuje dynamičtějším profilem jízdy a výraznějším zrychlením. Změny v cyklech NEDC a WLTP jsou vidět v následující tabulce a grafech.

WLTP cykly jsou rozděleny podle poměru výkon/váha [PWr] (počet kW na tunu vozidla) do 3 tříd.

třída 1: PWr \leq 22

třída 2: 22 < PWr \leq 34

třída 3: PWr > 34

Většina moderních automobilů má tento poměr mezi 40 a 100 a je tedy ve 3. třídě. Porovnání s NEDC v tabulce 1 je proto s touto třídou.

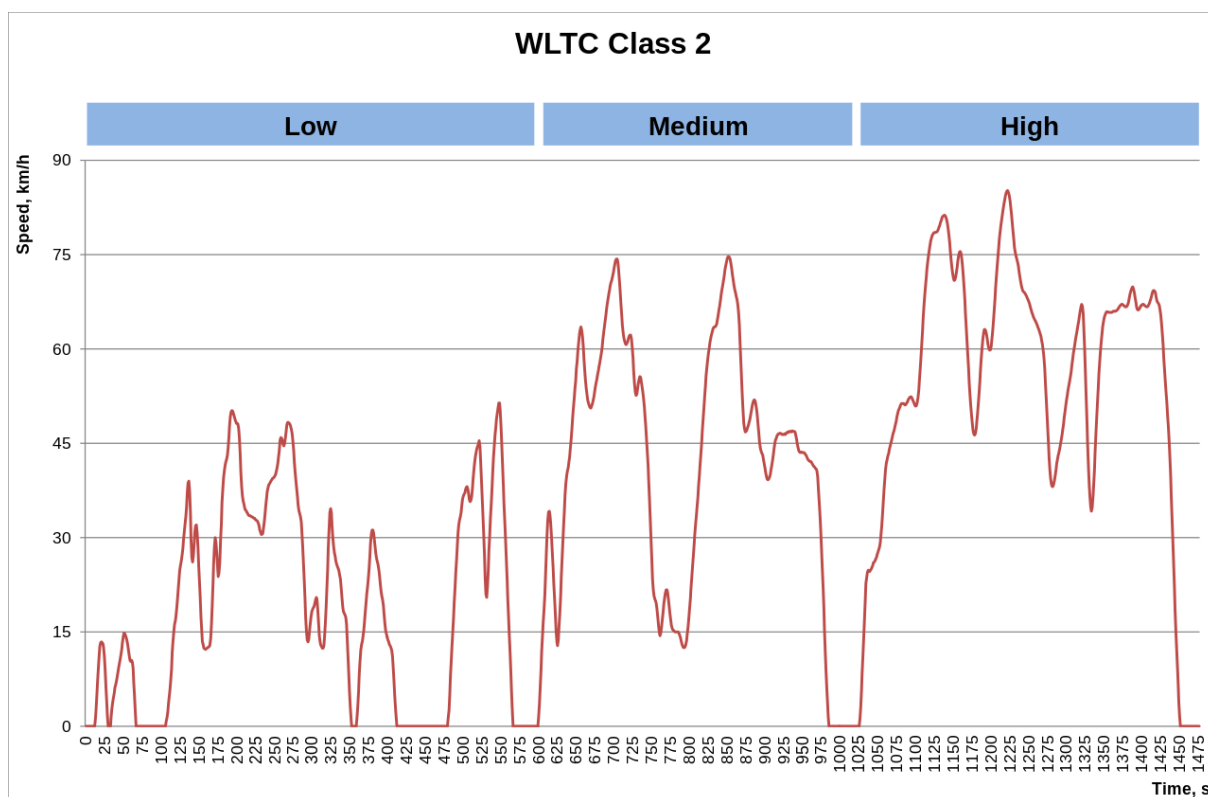
Tabulka 1 Porovnání WLTP a NEDC [17]

	NEDC	WLTP
Doba cyklu	20 minut	30 minut
Vzdálenost	11 km	23,25 km
Nejvyšší rychlost	120 km/h	131,3 km/h
Průměrná rychlost	34 km/h	46,5 km/h
Jízdní části	2 části	4 více dynamičtější části
Vliv volitelné výbavy	Nezvažovaný	Zohledňují se další prvky, které se mohou u jednotlivých vozidel lišit
Převodové stupně	Pevné okamžiky přeřazení	Různé okamžiky přeřazení u jednotlivých vozidel
Čas zastavení	24%	12.50%

Pro účely této bakalářské práce budeme využívat cyklu WLTC 2 pro automobily s výkonem mezi 22 a 34 kW na 1000 kg vozidla, a cyklus WLTC 1 pro automobily s výkonem do 22 kW na 1000 kg, protože do těchto kategorií bude spadat náš malý elektromobil. Cyklus WLTC 2 je vyobrazený v Grafu 1.

Na standard WLTP se přechází především v Evropě.

USA používá dosud vlastní testy jízdního cyklu navržené organizací EPA (United States Environmental Protection Agency). [24]



Graf 1 WLTC 2 [18]

3 Druhy a technologie elektromobilů

Základní části automobilu jsou karoserie, podvozek, brzdová soustava a hnací soustava. Karoserie představuje nosnou část automobilu, prostor pro posádku a umožňuje montáž ostatních částí vozidla. Podvozek se skládá z přední a zadní nápravy, odpružení, vozidlových kol, brzdové soustavy a řízení. Brzdová soustava zajišťuje snížení, či udržení rychlosti vozidla a zabraňuje rozjetí vozidla během stání. Hnací soustava rozvádí energii z motoru většinou přes hnací hřídele ke kolům. Motor je u automobilů s vnitřním spalováním zásobován palivem pomocí palivové soustavy.

V elektrických vozidlech je Palivová soustava nahrazena baterií a hnací soustavu zajišťuje elektromotor. V hybridních vozech pak mohou být tyto soustavy sériově, či paralelně doplněny o baterii a elektromotor.

3.1 Baterie

Baterie je u elektricky poháněných vozidel zpravidla komponent s nejvyšší cenou, váhou a objemem. Slouží k uskladnění energie pro pohon elektromobilu. [14]

Pro potřeby vývoje elektromobilu může být baterie považována za tzv. ‚černou skříňku‘, která má své parametry. Tyto parametry můžeme vidět v následující tabulce.

Tabulka 2 Základní parametry baterií

Parametr	Jednotka SI	Užívaná jednotka	převod	běžné rozmezí HEV	běžné rozmezí BEV
Napětí	Volt [V]	Volt [V]		100-200V	400-800V
Kapacita	Coulomb [C]	Ampérhodina [Ah]	1 Ah = 3600 C	2,5-20Ah	75-250 Ah
Množství energie	Joule [J]	Kilowatthodina [kWh]	1 kWh = 3 600 000 J	0,5-20 kWh	30-100 kWh
Měrná energie	Joule/Kilogram [J/kg]	Watthour/Kilogram [Wh/kg]	1 Wh/kg = 3600 J/kg	100 Wh/kg	100 Wh/kg
Hustota energie	Joule/meter ³ [J/m ³]	Watthour/Liter [Wh/l]	1 Wh/l = 3 600 000 J/m ³	200 Wh/l	200 Wh/l
Měrný výkon	Joule/(second*kilogram) [J/(s*kg)]	Watt/kilogram [W/kg]	1 W/kg = 1 J/(s*kg)		
Účinnost nabíjení	%	%		70-90%	70-90%
Energetická účinnost	%	%		závisí na použití	závisí na použití
Rychlost samovybíjení	x	x	x	závisí na podm.	závisí na podm.
Geometrie baterie	x	x	x	x	x
Teplotní rozpětí	K	°C	1 °C = 1 K	teplota okolí	teplota okolí
Životnost baterie		počet cyklů		700 - 1500	700 - 1500

Napětí udává počet Voltů, které baterie dodává do systému. Výhodou vysokého napětí je možnost dodání vyššího výkonu s nižšími ztrátami po kabelu daného průměru, a tedy i váhy, nevýhodou je pak nutnost využití součástí, které jsou schopné odolávat tomuto napětí v celém systému. Napětí se dá ovlivnit zapojením článků baterie do série. [14], [20]

Kapacita udává schopnost baterie dodávat elektrický proud, pokud je kapacita například 10 Ah, znamená to, že dokáže dodávat 1 Ampér po dobu 10 hodin, nebo také 10 Ampérů po dobu jedné hodiny. V reálném světě se však kapacita značně snižuje se zvyšujícím se množstvím dodávaného proudu kvůli nežádoucím chemickým reakcím v článcích baterie při vyšším zatížení. [10]

Množství energie v baterii ve Wh udává maximální energii, kterou baterie může vydat v průběhu jedné hodiny. [10]

Měrná energie udává množství energie na jeden kilogram baterie. [10]

Hustota energie udává množství energie na metr krychlový baterie. [10]

Měrný výkon udává rychlost výdeje energie vztaženou na kilogram baterie. Vyšší měrný výkon znamená, že baterie dokáže vydat energii uloženou v jednom kilogramu baterie rychleji. [10]

Účinnost nabíjení dostaneme podělením množství energie vložené do baterie a množstvím energie vydané. [10]

Energetická účinnost udává podíl energie dodané baterií a energie potřebné k dobytí baterie do původního stavu. Tento parametr se mění v závislosti na užívání baterie. Například při rychlém vybíjení a nabíjení baterie se energetická účinnost značně snižuje. [10], [14]

Rychlost samovybíjení baterie je množství energie za časový úsek, které baterie ztrácí v době, kdy není používána. Rychlost samovybíjení závisí jak na typu baterie, tak na jiných faktorech, především teplotě. [10]

Geometrie baterie může být dána výrobcem, nebo může být variabilní dle požadavků návrháře. Závisí na druhu baterie. Výhodou baterie s variabilní geometrií je volnost pro návrháře v rozložení baterií. [10]

Teplotní rozpětí, při kterém může baterie fungovat je důležitým faktorem. Většina baterií dokáže pracovat při běžných teplotách okolí, ale pro některé je potřeba baterii zahřát před používáním a chladit během, zatímco některé ztrácí účinnost při nižších teplotách a je potřeba je zahřívát. Tyto potřeby musíme brát v potaz při výběru baterie. [10]

Životnost baterie udává počet cyklů vybití a nabití baterie. Značně tak ovlivňuje náklady na provoz elektromobilu. [10]

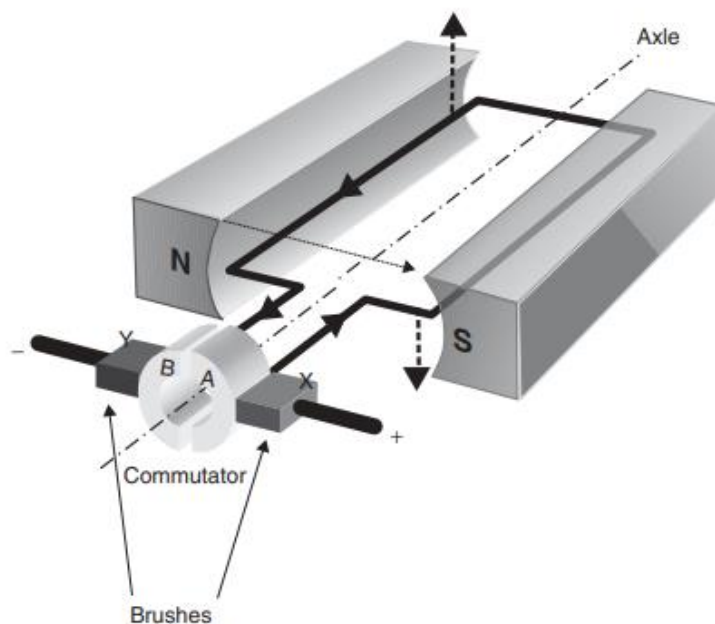
3.2 Elektromotor

Elektromotor je elektrická součástka, která převádí elektrickou energii na energii mechanickou. Skládá se ze statoru a rotoru. Rotor je otočná část elektromotoru, stator pevná část stroje. Tyto části jsou konstruovány tak, aby na sebe vzájemně působily jejich magnetická pole a vytvářely točivý moment. Mezi nimi je vzduchová mezera, která umožňuje otáčení stroje, tato mezera musí být co nejmenší, protože intenzita magnetického pole klesá s druhou mocninou vzdálenosti. [10]

Existuje mnoho typů elektromotorů, ty základní si popíšeme v následujících kapitolách.

3.2.1 Kartáčový stejnosměrný motor

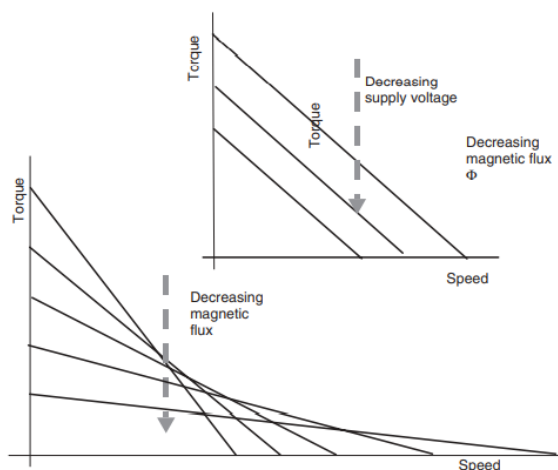
Nejjednodušším typem elektromotoru je kartáčový stejnosměrný motor. Používá se například v elektrickém nářadí, hračkách, elektrických oknech v autech, nebo malých domácích spotřebičích. Základní schéma můžeme vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 Schéma stejnosměrného kartáčového motoru [10]

Stator je tvořen permanentními magnety a rotor dvěma či více elektromagnety. Na přívodu elektrického proudu do rotoru je komutátor, který mění směr elektrického proudu, a tedy i polaritu magnetického pole na elektromagnetech během otáčení. V době mezi přepínáním polaritu se motor se dvěma elektromagnety otáčí z vlastní setrvačnosti. V praxi se využívá rotor s minimálně třemi elektromagnety v rotoru a třemi lamelami na komutátoru, aby se motor při změně polaritu nemusel otáčet z vlastní setrvačnosti a nedošlo ke zkratování při změně polaritu. Místo permanentních magnetů ve statoru je také možné použít budící cívky, které mají výhodu možnosti ovládní magnetického toku.

Tento motor je také jednoduché ovládat, maximální točivý moment klesá proporcionálně se snížením napětí na komutátoru. V tomto případě se nemění graf točivý moment/rychlost. Dále je možné motor ovládat snižováním magnetického toku na cívkách, v případě jejich využití místo permanentních magnetů, čímž měníme graf točivý moment/rychlost. Snížením magnetického toku se snižuje maximální točivý moment, ale zvyšuje maximální rychlost otáčení. Toto je žádoucí především díky eliminaci některých ztrát při vysokých otáčkách elektromotoru. Graf 2 ukazuje rozdíl snižování napětí a snižování magnetického toku.

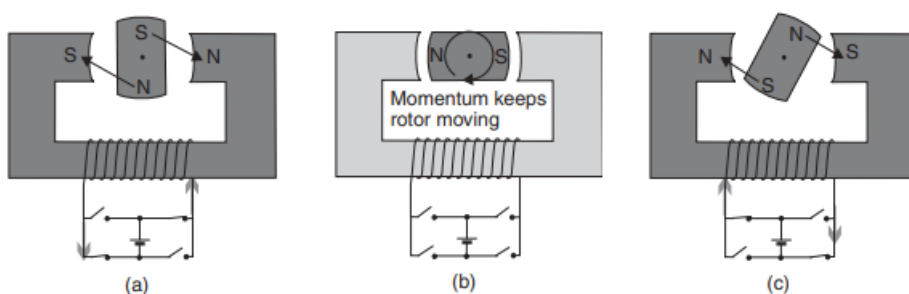


Graf 2 Ovládání stejnosměrného kartáčového motoru [10]

Přestože při použití cívek k vytváření magnetického pole ve statoru je potřeba elektrická energie a vytváří se teplo, mohou tyto motory být účinnější než motory s permanentními magnety právě díky eliminaci těchto ztrát. [10]

3.2.2 Bezkartáčový stejnosměrný motor

Nevýhodou kartáčového elektromotoru na stejnosměrný proud (DC) jsou kartáče, kde vzniká tření, a hlavně vznikání tepla uprostřed motoru. Následující typ DC elektromotoru se snaží tyto nevýhody eliminovat. I když motor nazýváme DC, tedy stejnosměrný, pracuje na střídavý proud (AC), který ovšem musí mít variabilní frekvenci a musí tedy pocházet z DC zdroje. Schéma tohoto motoru můžeme vidět na obrázku 2.



Obrázek 2 Schéma bezkartáčového stejnosměrného motoru [10]

Rotor je silný permanentní magnet. Přeměnu ze stejnosměrného na střídavý proud zajišťuje tzv. střídač. Ten udává frekvenci střídavého proudu. Frekvence musí samozřejmě být synchronizovaná s polohou rotoru, aby mohl motor pracovat. K zjištění polohy rotoru se tedy využívají většinou Hallové senzory, které určují polohu pomocí indukce. Mohou se také využívat optické senzory. Problém tohoto motoru s jednou cívkou tak, jak je vyobrazen na obrázku 2, je nerovnoměrnost velikosti točivého momentu. V praxi se tedy využívá motoru se třemi nebo více cívkami.

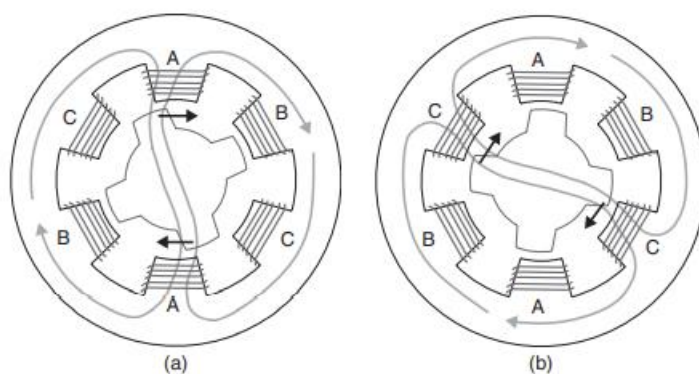
Tento typ motoru se s jednoduchou logikou řízení využívá především v počítačové elektronice, kde pohání ventilátory a plotny pevných disků. Se sofistikovanějšími řídicími jednotkami, které dokážou měnit proud v cívkách, a tedy i točivý moment, čímž vytváří flexibilní systém pro jízdu, je můžeme použít i jako pohon pro některá elektrická vozidla.

Díky nejednoznačnosti názvu tohoto motoru ho častěji můžeme najít pod názvem synchronní motor s permanentními magnety. [10]

3.2.3 Spínaný reluktanční motor

Reluktanční motor má rotor z magneticky měkkého materiálu. Ten se otáčí magnetizováním statoru cívkou. Oproti ostatním motorům nepoužívá permanentní magnety a otáčí se pouze tendencí magnetického rotoru minimalizovat vzduchovou mezeru mezi sebou a magnetickým státorem, když nejsou v rovině a tím i učinit magnetické pole symetrickým. Elektrické pole v statoru nemusí alternovat a rotorem je pouze magneticky měkký materiál a jedná se tedy o potenciálně velmi levný motor. Rychlost motoru se dá upravovat upravením délky a frekvence zapnutí cívký na statoru.

Největším problémem těchto motorů je jejich ovládání. Časování zapínání a vypínání cívký musí být velmi přesné. Točivý moment motoru také bývá značně kolísavý. Kolísavost se dá redukovat přidáním cívek na statoru. Rotor má pak výrůstky. Rotor mívá zpravidla o dva výrůstky méně než stator cívek. Schéma funkce tohoto motoru je zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3 Schéma spínaného reluktančního motoru [10]

Pro správné otáčení rotoru je třeba přesná informace o jeho momentální pozici. Toto je většinou zjišťováno senzory, ale modernější systémy dokážou pozici rotoru odečíst i bez nich pouze za pomoci čtení napětí a proudu z cívek. K tomu je třeba rychlá analýza těchto dat. Tu zajišťují speciální mikroprocesory. Tyto motory se používají především v produktech s velkými objemy a velkým tlakem na cenu jako jsou pračky. Kvůli nutnosti přesného ovládání se nevyplatí při výrobě jen pár kusů. Můžeme však v budoucnu očekávat jejich častější využití v elektromobilitě, právě díky jejich nízké ceně. I když je maximální účinnost

reluktančního motoru o trochu nižší než u ostatních motorů, dokáže si tuto účinnost udržet na vyšším rozpětí otáček i točivých momentů než jakýkoliv jiný typ elektromotoru. [10]

3.2.4 Indukční motor

Indukční motor je velmi používaný v průmyslu v mnoha strojích. K provozu potřebuje střídavý proud, ten však není problém pomocí střídače ze stejnosměrného proudu dodaného baterií vytvořit. Tyto motory jsou velmi spolehlivou a dostupnou variantou pro elektromobily. Rotor i stator jsou tvořeny cívkami. Cívkami statoru prochází třífázový proud, který vytváří točivé magnetické pole. V cívkách rotoru zapojených na krátko se indukují napětí a vzniklý proud vyvolává magnetický tok. Ten je spřažen s točivým magnetickým polem a vyvolává silové působení na rotor, který se otáčí.

Aby mohl Indukční motor fungovat, je potřeba aby frekvence točivého magnetického pole a frekvence otáčení rotoru byly různé. Rozdíl těchto frekvencí je tzv. skluz.

Rychlost otáčení magnetického pole můžeme upravovat skokově počtem pólů, ale především frekvencí střídavého proudu, podobně jako u bezkartáčového DC motoru. Rychlost otáčení magnetického pole neudává rychlost otáčení motoru, je mezi nimi skluz, ale pokud je do řídicí jednotky zavedena informace o úhlové rychlosti motoru, můžeme magnetické pole upravit na požadovanou rychlost.

Točivý moment indukčního motoru zpočátku roste s rychlostí otáčení, až se motor dostane do optimálního skluzu. Následně začíná klesat až k nulové hodnotě v případě srovnání otáčení motoru s otáčením magnetického pole. Maximální otáčky jsou tedy dány frekvencí střídavého proudu.

Indukční motory jsou hojně využívány v mnoha odvětvích. Díky velkým objemům výroby jsou tedy levné a díky rokům výzkumu i spolehlivé. Kvůli nutnosti indukce proudu v rotoru bývají však nepatrně (o 1-2 %) méně účinné než ostatní bezkartáčové elektromotory. [10]

3.2.5 Shrnutí

V předchozích kapitolách jsme si ukázali 4 základní druhy elektromotorů, všechny elektromotory jsou schopné dosáhnout vysokých účinností (viz tabulka 3) a všechny je možné použít v elektromobilech, zdaleka nejpoužívanější jsou však bezkartáčové stejnosměrné motory (Nissan Leaf, Tesla Model 3). Indukční motory fungují lépe tam, kde je potřeba vyšší výkon jako například v Tesla Model S. Stejnosměrné motory s permanentními magnety jsou menší, lehčí, jednodušší na ovládání a lépe se chladí, protože teplo v nich vzniká pouze ve statoru. Proto se lépe hodí do menších elektromobilů s nižším výkonem. Spínaný reluktanční motor se zatím nevyužívá, ale díky nízkým nákladům na výrobu při vysokých objemech se očekává jeho hojnější využití v následujících letech. Kartáčový motor

byl nahrazen lepšími variantami, ale stále ho používá s budícími cívkami například Renault Zoe. [15]

3.2.6 Účinnost stejnosměrných motorů

Ve všech elektrických motorech při jejich provozu vznikají ztráty výkonu, které se dají rozdělit do několika kategorií.

Ztráty mědi jsou způsobeny odporem v měděných drátech a kartáčích. Odpor zahřívá dráty a část elektrické energie je tedy přeměněna na teplo místo na mechanickou práci. Tato ztráta roste s druhou mocninou proudu procházejícího drátem. Vzhledem k tomu, že točivý moment je přímo úměrný proudu ve stejnosměrném motoru, můžeme vyvodit vztah

$$\text{Ztráty mědi} = k_c T^2$$

Rovnice 1 Ztráty mědi

Kde T je točivý moment a k je konstanta závislá na odporu drátů, kartáčů a magnetickém toku. Ztráty mědi mývají především v malých elektromotorech největší podíl na celkových ztrátách.

Ztráty železa jsou dvojnásobné a jsou způsobeny přítomností železa v rotoru v neustále se měnícím magnetickém poli. Tzv. hysterezní ztráty jsou důsledkem nutnosti neustálého magnetizování železného jádra v různých směrech. Ve většině motorů s magneticky měkkým jádrem jsou tyto ztráty malé, ale nikdy nulové. Druhý typ ztrát železa je způsoben indukci tzv. vířivých proudů v železném jádře. Tyto proudy zahřívají jádro. Tyto ztráty můžeme redukovat použitím více plátů železa oddělených barvou, namísto jednoho bloku železa, čímž efektivně zvýšíme elektrický odpor jádra, a tedy snížíme velikost vířivých proudů.

Ztráty železa jsou závislé na frekvenci změny magnetického pole. Vyšší frekvence znamená častější magnetizování jádra, a tedy vyšší hysterezní ztráty a zároveň vyšší indukci vířivých proudů. Frekvence je závislá na rychlosti otáčení motoru. Můžeme tedy napsat, že

$$\text{ztráty železa} = k_i \omega$$

Rovnice 2 Ztráty železa

Kde ω je úhlová rychlost motoru a k_i konstanta. Ve skutečnosti k_i nebývá konstantní, jelikož závisí mimo jiné na síle magnetického pole, ale většinou pro daný motor lze najít hodnotu k_i , která dobře popisuje železné ztráty motoru.

Dalšími ztrátami jsou ztráty třením a odporem vzduchu. Tření vzniká na kartáčích a ložiscích motoru, odpor vzduchu vzniká otáčením rotoru. Odpor vzduchu může být vysoký zejména pokud je na motor přidělán fén pro chlazení motoru. Třecí síla bývá konstantní, zatímco síla

odporu vzduchu je závislá na druhé mocnině rychlosti otáčení motoru. Abychom z těchto sil dostali výkonnostní ztráty, je potřeba je vynásobit úhlovou rychlostí. Dostaneme tedy rovnice

$$\text{ztráty třením} = T_f \omega \quad , \quad \text{ztráty odporu vzduchu} = k_w \omega^3$$

Rovnice 3 Ztráty třením a odporem vzduchu

Kde T_f je točivý moment způsobený třecími silami v motoru a k_w je konstanta odporu vzduchu závislejší především na velikosti rotoru a přítomnosti chladícího fénu.

V poslední řadě jsou v motoru ztráty, které se projevují i když je motor v klidu. Tyto jsou způsobeny nutností napájení řídicí jednotky některých motorů a generováním magnetického pole v cívkách. Jediným motorem, kde mohou tyto ztráty být nulové je stejnosměrný motor s kartáči a permanentními magnety. Tyto ztráty se označují písmenem C.

Tyto rovnice jsme si popsali sice na nejjednodušším motoru, ale jsou platné pro, nebo dobře aproximují všechny druhy elektromotorů. Je vhodné tyto ztráty zapsat do jedné rovnice pro celkové ztráty elektromotoru. Vzhledem k tomu, že ztráty železa a ztráty třením jsou závislé na rychlosti, můžeme je zapsat do jednoho členu rovnice. Dostaneme tedy rovnici

$$\text{Ztráty} = k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C$$

Rovnice 4 Celkové ztráty elektromotoru

Většinou nás zajímá účinnost motoru η_m , která se pak spočítá podělením výstupního výkonu výkonem vstupním.

$$\eta_m = \frac{\text{výstupní výkon}}{\text{výstupní výkon} + \text{ztráty}}$$

$$\text{výkon} = \text{točivý moment} * \text{úhlová rychlost} = T\omega$$

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C}$$

Rovnice 5 Účinnost elektromotoru

Tato rovnice je užitečná při modelování elektromobilů. Vhodné konstanty lze najít experimentálně, nebo regresí ze změřené hodnoty účinnosti elektromotoru. [10]

V tabulce 3 můžeme vidět minimální účinnosti indukčního motoru v závislosti na výkonu motoru a počtu tyčí, aby motor obdržel nejvyšší certifikaci evropské unie IE4. Můžeme předpokládat, že většina kvalitních motorů ostatních typů se bude pohybovat kolem těchto účinností, bezkartáčový stejnosměrný a spínaný reluktanční mohou mít o účinnost i o 1-2 % vyšší. [10]

Tabulka 3 Minimální účinnosti indukčního motoru IE4 [16]

Rated output power P_N [kW]	Number of poles			
	2	4	6	8
1,1	85,2	87,2	84,5	80,8
1,5	86,5	88,2	85,9	82,6
2,2	88	89,5	87,4	84,5
3	89,1	90,4	88,6	85,9
4	90	91,1	89,5	87,1
5,5	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	91,7	92,6	91,3	89,3
11	92,6	93,3	92,3	90,4
15	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	93,7	94,2	93,4	91,7
22	94	94,5	93,7	92,1
30	94,5	94,9	94,2	92,7
37	94,8	95,2	94,5	93,1
45	95	95,4	94,8	93,4
55	95,3	95,7	95,1	93,7
75	95,6	96	95,4	94,2
90	95,8	96,1	95,6	94,4
110	96	96,3	95,8	94,7
132	96,2	96,4	96	94,9
160	96,3	96,6	96,2	95,1
200 up to 249	96,5	96,7	96,3	95,4
250 up to 314	96,5	96,7	96,5	95,4
315 up to 1 000	96,5	96,7	96,6	95,4

3.2.7 Ztráty a velikost elektromotorů

Kromě zmíněné účinnosti elektromotoru ovlivňují ztráty také maximální výkon motoru dané velikosti. To je dáno tím, že ztrátami vzniká v motoru teplo a v určitém množství dodané energie není již teplo vzniklé ztrátami v elektromotoru možné konvekcí, kondukcí, ani radiací odstranit a motor se tedy přehřeje. Díky tomu vlastnosti motorů jako měrný výkon a hustota výkonu, tedy výkon vztažený na jednotku hmotnosti a jednotku objemu, nejsou ovlivněny elektrickými vlastnostmi, ale spíše schopností efektivně odstranit teplo z motoru. Zde leží největší nevýhoda klasického stejnosměrného kartáčového motoru. V tomto typu motoru téměř všechny tyto ztráty vznikají v rotoru uprostřed motoru. Díky tomu je náročnější zbytkové teplo odstranit. V ostatních typech motorů bývá teplo produkované zpravidla ve

statoru a je tedy jednodušší jej odstranit ať už klasicky vzduchovým chlazením, nebo u větších motorů i vodním chlazením. Můžeme tedy u těchto motorů dosáhnout vyšších hodnot měrného výkonu a hustoty výkonu.

Fakt, že motory jsou výkonnostně limitovány odpadním teplem nám také ukazuje na jednu z hlavních výhod elektromotorů a to, že mohou po krátkou dobu operovat nad jejich limitem daným výrobcem. Pokud máme například motor s výkonem 5kW, což znamená, že po asi 30 minutách provozu s tímto výkonem se jeho teplota ustálí na provozních 80 °C, což je pro motor bezpečné. Znamená to ale, že můžeme na chvíli motor provozovat při výkonu vyšším než 5kW, pokud je motor studenější a výkon snížíme, než se motor stihne nebezpečně zahřát. Toto se často využívá v elektromobilech, kde je vyšší výkon potřeba jen na krátké časové intervaly, například při akceleraci. [10]

3.2.8 Elektromotory jako brzdy

Elektromotory jsou schopné nejen převádět elektrickou energii na energii kinetickou, ale i naopak. Toto je důležitá vlastnost pro elektromobily. Při otáčení motoru se v cívkách indukuje napětí a zároveň v motoru vzniká záporný točivý moment, který brzdí automobil. Toto napětí prochází přes stejnosměrný měnič, který upravuje napětí z motoru na napětí, které je naše baterie schopna přijmout. Tím můžeme i upravovat sílu brzdění, při vyšších rychlostech by bylo napětí na motoru při brzdění příliš vysoké, kdyby byl motor napojen na baterii přímo, a brzdny účinek tedy příliš silný, naopak při nižších rychlostech by napětí na motoru mohlo být nižší než v baterii, a tedy by k brzdění vůbec nedošlo. Stejnosměrný měnič nemá stoprocentní účinnost a můžeme tedy napsat

$$V_b \times I_b = \eta_c \times V_m \times I_m$$

Rovnice 6 Brzdná účinnost

Kde V_b je napětí mířící do baterie, I_b je proud do baterie, V_m je napětí produkované motorem, I_m je proud z motoru a η_c je účinnost stejnosměrného měniče.

Motor tedy můžeme využít k dodání točivého momentu na různé škále rychlostí a zároveň k brzdění elektromobilu. Toto vše je řízeno elektrickými obvody a logikou v řídicích jednotkách. [10]

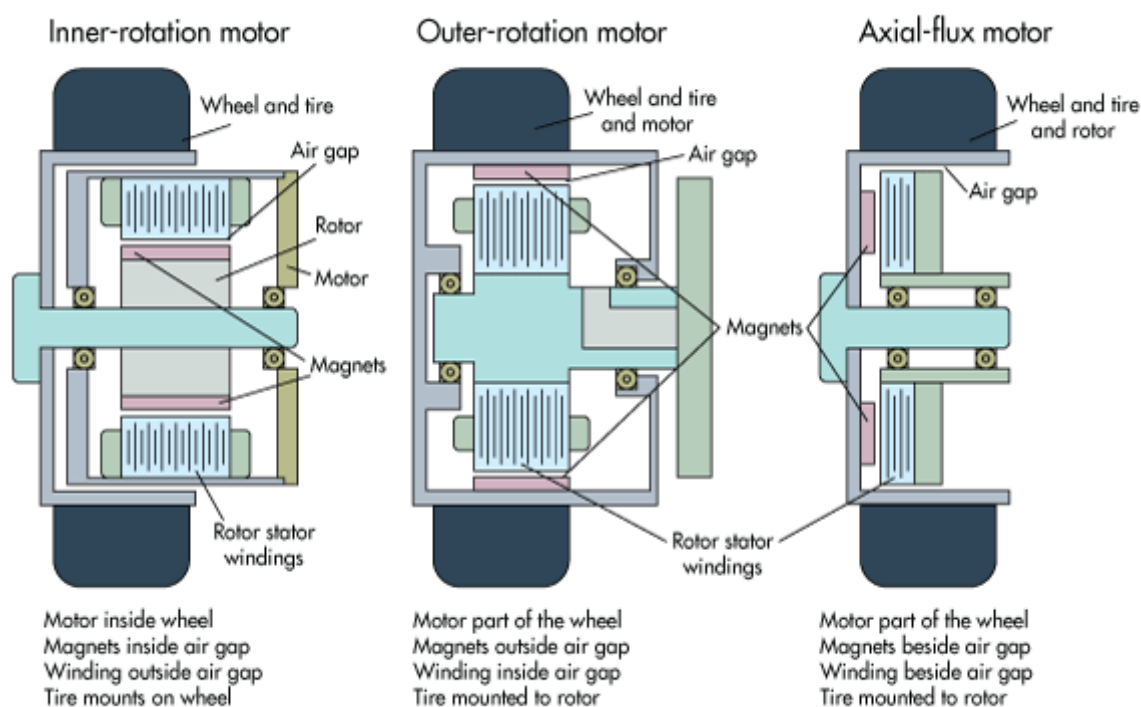
3.2.9 Elektromotor v kole

Motor v kole je specifický v několika ohledech. Samotný motor musí být dostatečně malý, aby se vešel do kola vozidla, neboť je jeho součástí, na rozdíl od běžných implementací, kdy je motor ke kolu připevněn přes hřídel a převody. Motor v kole může být buď napojen napřímo, kdy je rychlost otáčení motoru rovna rychlosti otáčení kola, nebo se motor může

otáčet rychleji a být převeden na požadovanou rychlost pomocí jednostupňové převodovky. [45]

Motory s převodem mohou být mnoha typů a v praxi můžeme použít jakýkoliv typ elektromotoru. Nejtěžší překážkou v této variantě je optimalizace celého hnacího ústrojí a brzdy tak, aby se do kola vešla. Tato varianta vrací do systému některé ztráty, které motor bez převodů eliminuje. Dále se budeme tedy zabývat motory se zapojením napřímo. [30]

Pro zapojení napřímo musíme využít motory s nízkými otáčkami, kolo běžné velikosti má i při rychlosti 100 km/h méně než 1000 ot/min. Pro účely motoru v kolech můžeme využít motory se vnitřním rotorem, motory s vnějším rotorem, kde vnější část motoru obíhá okolo vnitřního statoru, nebo motory s axiálním indukčním tokem, kde se komponenty elektromotoru otáčejí vedle sebe. Všechny tyto uspořádání můžeme vidět na obrázku 5. [45]



Obrázek 4 Různé možnosti uspořádání motoru v kole [45]

Motor v kole může být mnoha typů, ale nejčastějším je bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentním magnetem. Tento motor můžeme navrhnout v jakékoliv z konfigurací na obrázku 6. Motory s axiálním indukčním tokem ale musí být fyzicky moc velké, nebo využít drahé a vzácné magnety, aby byly schopné dodávat dostatečný točivý moment, a proto se pro tyto aplikace nepoužívají. Další možnosti jsou motor s vnitřním rotorem a motor s vnějším rotorem. Obě varianty jsou možné. [45]

Motor s vnějším rotorem má rotor v podobě ráfku vozidla, na který je rovnou napasována pneumatika. Tento typ by byl preferovaný v případě, kdy je délka motoru stejná či menší než šířka pneumatiky. V opačném případě by motor vyčníval z pneumatiky, zhoršoval by jízdní vlastnosti vozidla. Jelikož je rotor zároveň ráfkem vozidla, je také více náchylný na poškození od nečistot z vozovky a jiných vnějších vlivů. [45], [30]

Motor s vnitřním rotorem funguje na principu vysvětleném v kapitole 3.2.2. Jeho výstup je napojen přímo na kolo. Motor je tak do určité míry chráněn před vnějšími ráfkem kola.

Důležitým faktorem při výběru typu elektromotoru je cena. Nejdražší součásti jsou měď ve vinutí cívek a magnety rotoru. V konfiguraci s vnějším rotorem menší stator otáčí větším rotorem kolem sebe, magnety rotoru musí tedy být větší, ale nemusí být tak silné, vinutí je naopak menší. V konfiguraci s vnitřním rotorem je více vinutí na cívkách, magnety jsou však menší a musí proto být silnější.[45]

Pokud máme daný rozměr pneumatiky, výkon motoru můžeme zvýšit jeho prodloužením, nebo použitím silnějších magnetů. Použití silnějších magnetů u motoru s vnějším rotorem může být výhodné, pokud motor požadovaného výkonu a velikosti přesahuje délkově šířku pneumatiky. [45], [30]

Výhodou zabudování motoru do samotného kola vozidla je především zjednodušení konstrukce vozidla a snížení mechanických ztrát hnacího ústrojí automobilů. Tyto ztráty v běžných automobilech na fosilní paliva závisí především na pohnu nápravy. U automobilů s přední hnanou nápravou (FWD) jsou 10–15 %, při pohonu zadní nápravy (RWD) se pohybují mezi 15 % a 20 % a u automobilů s pohonem všech kol (AWD) mohou dosahovat až 30 %. U elektromobilů jsou tyto ztráty díky absenci spojky nižší, avšak motor v kole tyto ztráty téměř zcela eliminuje. [25]

Motor v kole také díky vypuštění těchto komponent zajistí snížení váhy vozidla a umožňují více místa pro baterie. Eliminace ztrát a větší místo pro baterie umožňují vyšší dojezdové vzdálenosti. [26]

Další výhodou je jednoduché ovládání jednotlivých kol pomocí řídicí jednotky nezávisle na sobě. Tak můžeme zvýšit bezpečnost vozidla v krizových situacích, kde by to s klasickým pohonem nebylo možné. [27]

Značnou nevýhodou motorů v kolech je neodpružená hmotnost motorů v kolech. Motor v kole přispívá vyšší neodpružené váze vozidla na rozdíl od motoru, který je uložen v šasi vozidla a je tak odpružen se zbytkem vozu. Vyšší váha kola s motorem se negativně projevuje na některých jízdních vlastnostech automobilu. Tato překážka se dá zmírnit především díky přesnému a okamžitému ovládání jednotlivých kol a použití lehčích materiálů

na výrobu motorů. Motory dále musí být odolné vůči nárazům a vibracím a chráněné vůči vnějším vlivům, protože se nachází na rozhraní mezi vozidlem a vozovkou. [26], [27]

Nutnost využití minimálně dvou motorů také zvyšuje konečnou pořizovací cenu elektromobilu s touto technologií.

3.2.9.1 ABS pomocí kontroly točivého momentu motorem v kolech

Anti-lock brake systém (ABS) je jedním z hlavních systémů aktivní bezpečnosti vozidel. Zabraňuje zablokování kol při brzdění vozidla a tím zaručuje možnost vozidlo ovládat i při prudkém brzdění, nebo na kluzkých površích. Zároveň snižuje brzdnou vzdálenost vozidel. [28]

Tradičně je tohoto docíleno pomocí elektro-hydraulických akčních členů, které ovládají brzdnou sílu na základě informací ze senzorů z kol. Elektromobil s motorem v kole tyto akční členy nepotřebuje, neboť k ovládní točivého momentu využívá samotného motoru s 10-100x rychlejším reakčním časem. [29]

Motor můžeme využít k brzdění vozidla, pokud mu dodáme záporný točivý moment, ale brzdná síla motoru je závislá na jeho výkonu. Díky tomuto omezení není možné motor v kolech používat jako brzdu samostatně a využívá se v kombinaci s klasickými třecími brzdami. V nízkých rychlostech, či při méně prudkém brzdění, kde motor dodává dostatečnou brzdnou sílu může však tato metoda klasický systém ABS i předčít. [29]

Další značnou nevýhodou ABS pomocí motoru v kolech je fakt, že k využití maximálního brzdného účinku motoru tato metoda spotřebovává elektrickou energii. Využíváme tedy regenerativní brzdění v kombinaci s klasickou třecí brzdou.

3.2.9.2 Torque vectoring

Torque vectoring je technologie, která umožňuje automobilu nezávislé ovládní točivého momentu jednotlivých kol nebo náprav při zatáčení vozidla. Tato technologie byla vyvinuta ke zlepšení odezvy řízení a ovladatelnosti vozidla, zároveň vylepšuje i dynamiku vozidla.

U automobilů se spalovacími motory je toto provedeno mechanicky, ale elektromobily s motory v kolech rozdělují točivý moment pomocí softwaru. Aby ovládní softwarem fungovalo je potřeba synchronizovat práci všech subsystémů powertrainu a pochopit interakci mezi nimi. [55]

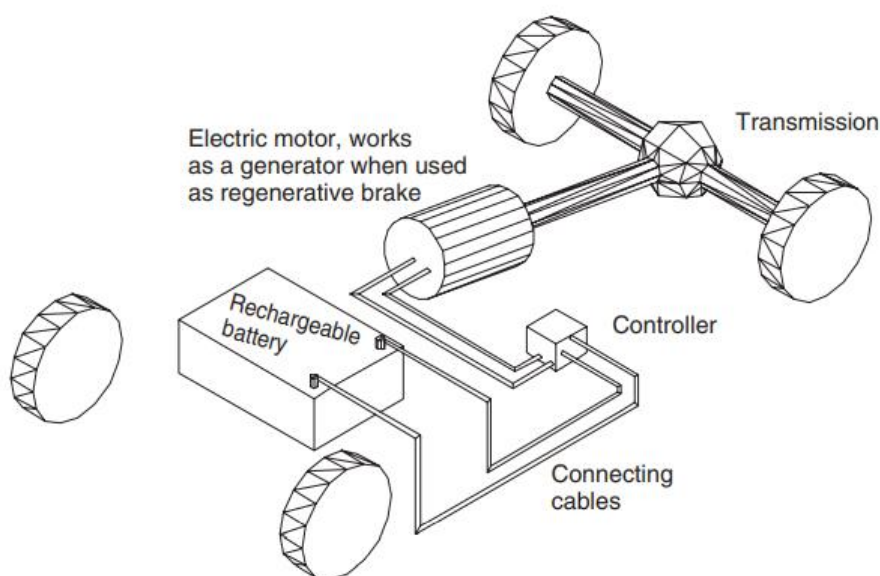
3.3 Elektromobil s baterií (BEV)

Tento v dnešní době velmi rozšířený koncept je nejjednodušším typem elektromobilu. Palivová soustava je nahrazena baterií dobíjenou z elektrické sítě. Hnací soustavu tvoří řídicí jednotka a elektromotor, který zároveň funguje jako generátor a částečně či úplně zastává

funkci brzdové soustavy při regenerativním brzdění (rekuperace). Tento typ pohonu používají elektrická kola až po sériově vyráběné elektromobily. Jednotlivé typy elektromobilů s baterií se liší především velikostí a druhem baterie, výkonem a druhem motoru a množstvím a umístěním elektromotorů.

3.3.1 BEV s centrálním elektromotorem

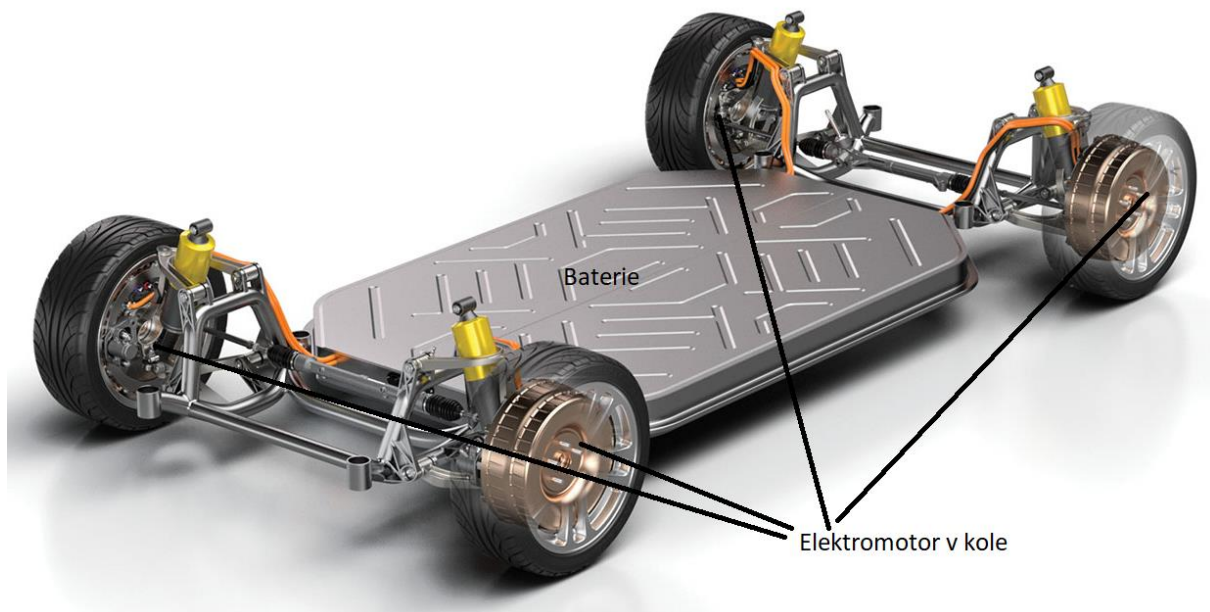
Při použití jednoho či více elektromotorů uprostřed vozidla musí energie ke kolům procházet přes hřídel a diferenciál, což způsobuje ztráty třením v těchto komponentech a zároveň není možná kontrola jednotlivých kol pomocí elektromotoru a je nutné tyto funkce zastupovat jinými systémy jako je například tradiční ABS a ESP.



Obrázek 5 Základní schéma elektromobilu s baterií [10]

3.3.2 BEV s motory v kolech

Motor ve středu vozidla je v tomto případě nahrazen motory v kolech. Motor můžeme umístit do dvou, nebo čtyřech kol v závislosti na požadovaném výkonu, ceně a využití vozidla. Řídící jednotka pak může každé kolo ovládat nezávisle na sobě. Schéma BEV s motory v kolech můžeme vidět na obrázku 5.



Obrázek 6 Schéma BEV s motory v kolech [47]

4 Průzkum trhu

4.1 Malé elektromobily

V případě malých elektromobilů zatím neexistuje na evropském trhu varianta s elektromotory v kolech. Většina automobilek vsadila na jeden centrální elektromotor uložený vpředu, nebo vzadu vozidla, z kterého rozvádí točivý moment na jednu nápravu.

4.1.1 Renault Zoe

Renault Zoe je malý elektromobil francouzské značky Renault. V současné době se prodává ve dvou motorizacích s motorem R110 o výkonu 80 kW a točivém momentu 225 Nm a R135 o výkonu 100 kW s točivým momentem 245 Nm. Oba motory jsou kartáčové s budícími cívkami a pohání přední nápravu elektromobilu. Vůz se dodává s lithium-ion baterií s energií 52 kWh, která umožňuje vozu dojezd až 395 km podle WLTP. Cena tohoto vozu na českém trhu začíná na 845 000 Kč s motorem R110, s motorem R135 je pak stanovena na 910 000 Kč. [31], [32]

4.1.2 Opel Corsa-e

Opel Corsa-e je německý elektromobil s motorem o výkonu 100 kW s točivým momentem 260 Nm. Motor je bezkartáčový stejnosměrný a pohání přední nápravu vozidla. Lithium-ion baterie s energií 50 kWh dodává vozu dostatek energie na ujetí 330 km na jedno nabití podle WLTP. Cena vozu začíná na 780 000 Kč. [33]

4.1.3 BMW i3

Bezkartáčový stejnosměrný motor německého elektromobilu o výkonu 125 kW s točivým momentem 250 Nm pohání zadní nápravu vozidla. Lithium-ion baterie má energii 42 kWh a elektromobil s ní ujede 310 km na jedno nabití podle standardu WLTP. Cenově vůz začíná na 970 000 Kč. [35]

4.1.4 Smart EQ fortwo

Malý elektromobil do města má bezkartáčový stejnosměrný motor o výkonu 60 kW a točivém momentu 160 Nm, který pohání zadní nápravu vozidla. Baterie s energií 17,6 kWh umožňuje vozidlu dojezd až 159 km na jedno nabití dle starého standardu NEDC. Reálný dojezd se pak pohybuje kolem 110 km. Cena začíná na 640 000 Kč. [49]

4.1.5 Aixam E City Pack

Výrobce automobilů Aixam se soustředí na tzv. „mopedauta“ jejichž výkon je omezen na 6 kW a rychlost na 45 km/h, tato kategorizace umožňuje vozidlo řídit již od 15 let s řidičským průkazem AM. Jejich elektrická řada eAixam nabízí tedy dvoumístné vozidlo s výkonem 6 kW a točivým momentem 50 Nm s pohonem předních kol. Dojezd elektromobilu je podle výrobce 70 km a cena začíná na 435 000 Kč. [50]

4.1.6 Renault Twizy

Renault Twizy je malý dvoumístný elektromobil se sedačkami za sebou francouzské automobilky Renault. Indukční motor má maximální výkon 13 kW a točivý moment 57 Nm. Akumulátor má energii 6,1 kWh a dojezd automobilu dle staršího standardu NEDC je 100 km. Dle standardu WLTP je pak 80 km. Spotřeba je udávána na 63 Wh/km. Cena začíná na 349 000 Kč. [53], [23]

4.1.7 Citroen AMI

Další malý elektromobil pro řidičský průkaz kategorie AM, výkon i maximální rychlost jsou tedy omezeny na 6 kW a 45 km/h. Cena hrála při designu hlavní roli a elektromobil se vyznačuje například stejnými dveřmi pro řidiče i spolujezdce, které se tak otevírají každé na jinou stranu. Baterie s energií 5,5 kWh umožňuje malému vozítku dojezd 70 km. Cena je nastavena na 152 100 Kč. [34]

4.1.8 Souhrn

V tabulce 4 můžeme vidět důležité informace o vozidlech z předchozích kapitol. V této bakalářské práci se budeme snažit těmito parametry přiblížit spíše elektromobilům se dvěma sedadly.

Tabulka 4 Parametry malých elektromobilů

	počet míst	výkon [kW]	točivý moment [Nm]	energie baterie [kWh]	dojezd [km]	hmotnost [kg]	cena [kč]
Renault Zoe	5	80	225	52	395	1577	845 000
Opel Corsa-e	5	100	260	50	330	1455	780 000
BMW i3	4	125	250	42	310	1345	970 000
Smart EQ fortwo	2	60	160	17,6	159	1071	640 000
Aixam e City Pack	2	6	50	5,1	70	440	435 000
Renault Twizy	2	13	57	6,1	80	445	349 000
Citroen AMI	2	6	40	5,5	70	485	152 100

4.2 Vozidla s elektromotorem v kolech

Elektromotory v kolech se zatím využívají primárně v elektrokolech a motocyklech. Existuje však několik konceptů a budoucích vozidel v různých stádiích vývoje, které tuto technologii využívají.

4.2.1 Luka EV in-wheel

Luka EV in-wheel od české automobilky MW MOTORS napodobuje retro vzhledem automobily společnosti Volkswagen. Je podle výrobce prvním sériovým elektromobilem na trhu s motory v kolech. Předobjednávky zatím nejsou na stránkách výrobce možné, poslední plánovaná možnost předobjednání byla stanovena na čtvrté čtvrtletí 2021. Celkem má mít 4 bezkartáčové stejnosměrné motory o výkonu 12,5 kW v každém kole, celkový výkon vozidla je tedy 50 kW. Baterie je lithium-ion s kapacitou 21,9 kWh, se kterou automobil ujede na jedno nabití dle výrobce 300 km. Dojezd je pravděpodobně měřen standardem WLTP, jedná se však zatím o interní testování firmy, které zatím není potvrzeno nezávislou třetí stranou. Cena elektromobilu začíná na 40 000 € (1 020 000 Kč) bez daně. Výrobce již oznámil nový model traditional, který nahradil motory v kolech jedním bezkartáčovým stejnosměrným elektromotorem o výkonu 55 kW. [36], [37], [38]

4.2.2 Lightyear one

Elektromobil s elektromotorem vlastního designu firmy Lightyear v každém kole je v současné době ve fázi předobjednávek. Na střeše elektromobilu se nachází solární panel o velikosti 5 m². Výroba by měla začít v létě 2022. Dle výrobce dosáhl vůz v cyklu WLTP účinnosti 91 % a účinnost hnacího ústrojí je 97 %. Maximální točivý moment vozidla byl pak při testování 1920 Nm. Údaje o typu a výkonu motorů či kapacitě baterií výrobce na svých stránkách zatím neudává. Cena první série 946 elektromobilů je stanovena na 150 000 € (3 823 000 Kč) bez daně. [39], [40], [41]

4.2.3 Lordstown Endurance

Pick-up truck americké společnosti Lordstown Motors Corporation využívá motor L1500 od společnosti elaphe v každém kole. Jeden tento motor má výkon 110 kW a točivý moment 650 Nm. Dojezd na jedno nabití je dle amerického standardu EPA 250 mil (400 km). Automobil má již přes 100 000 předobjednaných vozů a výroba by měla začít ve třetím čtvrtletí roku 2022. Cena vozu začíná na \$55 000 (1 250 000 Kč). [42], [43], [44]

4.3 Elektromotory

4.3.1 Elaphe

Firma Elaphe nabízí 4 elektromotory s vnějším rotorem a zapojením napřímo. Motor S400 je navržen pro lehké elektrické a hybridní vozy a umožňuje integraci se standardní bubnovou či kotoučovou brzdou. Motor M700 je určen do kol velikosti 15 nebo 16 palců. Je také kompatibilní se standardními brzdami. Motor M1100 je výkonný motor navržený do těžkých podmínek, vhodný do vlaků a autobusů. Motor L1500 má vlastní kotoučové brzdy a je navržen pro velká SUV, off-roady a dodávky. Motory můžeme vidět na obrázku 7. [44]



Obrázek 7 Elektromotory elaphe [44]

Parametry jednotlivých motorů můžeme vidět v tabulce 5.

Tabulka 5 Parametry motorů elaphe

model	Velikost kola ["]	Váha [kg]	výkon [kW]	max výkon [kW]	točivý moment [Nm]	max točivý moment [Nm]	max rychlost [ot/min]	jmenovité napětí [V]
S400	14	17,6	11	19,5		400	750	48
S400	14	17,6	23	40		400	1565	100
M700	15-16	23	50	75	400	700	1500	300
M1100	18	40	70	90	700	1100	1160	370
L1500	20	34,8	77	110	650	1500	1480	370

4.3.2 Protean

Firma Proteanelectric vyrábí motory integrované v kolech. Jejich schéma můžeme vidět na obrázku 8.



Obrázek 8 Kolo s elektromotorem Protean [46]

Firma vyrábí dva motory. Motor Pd18 a Pd16. Jedná se o stejnosměrné bezkartáčové motory s vnějším rotorem se zapojením napřímo. Motor Pd18 je navržen do kola velikosti 18“ Pd16 do kola velikosti 16“. Oba motory mají integrovanou třecí brzdu. Jejich parametry můžeme vidět v tabulce 6. [46], [47]

Tabulka 6 Parametry motorů Protean

model	Velikost kola ["]	Váha [kg]	výkon [kW]	max výkon [kW]	točivý moment [Nm]	max točivý moment [Nm]	max rychlost [ot/min]	max rychlost [km/h]	jmenovité napětí [V]	rozpětí napětí [V]
Pd18	18	36	60	80	650	1250	1600	225	400	150-435
Pd16	16	28	26	40		800	1200*	150		

* vypočtená hodnota

Cena většího z motorů by se měla pohybovat kolem \$1600 za motor (v přepočtu 41 000 Kč). [48]

4.3.3 QS motors

QS motors je čínský výrobce elektromotorů a příslušenství. vyrábí celou škálu elektromotorů v kolech pro motorky i pro elektromobily. Jedná se o bezkartáčové stejnosměrné elektromotory s vnějším rotorem zapojené napřímo. Skupina SiaEcosys pak nabízí sety na přestavbu aut na elektromobily. Tyto sety obsahují kromě motorů řídicí jednotky, plynový pedál, ukazatel rychlosti, disky a další potřebnou elektroniku. Budeme se tedy řídit cenou za celou sadu. [51], [52], [54]

K porovnání jsou k dispozici motory „QSMOTOR 12inch 5000W electric wheel hub motor“ a „QSMOTOR 273 8000W 273 50H V3 E-Car Hub Motor“ o výkonu 5000 W a 8000 W, motor 8000W můžeme napájet napětím 96, 72, nebo 48 V. Jejich parametry můžeme vidět v tabulce 7. Cena je uvedena za 2 motory s příslušenstvím. [51], [52], [54]

Tabulka 7 Parametry motorů QS Motor

výrobce	model	Velikost kola ["]	Váha [kg]	výkon [kW]	max		rychlost [ot/min]	rychlost [km/h]	jmenovité napětí [V]	cena [kč]
					výkon [kW]	točivý moment [Nm]				
QS Motor	5000W	12	21	5	10	270	1080	90	48-96	50 000
QS Motor	8000W	14	25	8	19	350	1200	115	48-96	77 800
QS Motor	3000W	12	18,5	3	6	181	780	65	48-96	40 895

Cena nezahrnuje dopravu z číny, která je v přepočtu 18 000 Kč pro model 3000W, 21 500 Kč pro model 5000W a 28 200 Kč pro model 8000W. [51], [52], [54]

4.4 Baterie

Baterie je zpravidla nejdražším prvkem elektromobilu. Na základě průzkumu provedeného v bakalářské práci kolegy s návrhem elektromobilu s elektromotorem uprostřed jsem se rozhodl vybrat baterii od firmy Calb typu LiFePo4. Její parametry můžeme vidět v tabulce 8. [20]

Tabulka 8 Parametry bateriového článku Calb

označení	kapacita [Ah]	napětí [V]	hmotnost		energie [Wh]	měrná energie		cena za kWh [kč]
			[kg]	cena [kč]		[Wh/kg]	[kWh]	
B150	150	3,2	2,95	2174	480	162,71	4529,17	

5 Návrh vozidla

V této bakalářské práci se chceme přiblížit vozidlu Renault Twizy, popřípadě smart EQ fortwo, co do výkonu, kapacity baterie i dojezdu.

5.1 Motor

Motory z kapitoly 4.3 vhodné do našeho elektromobilu jsou model S400 od společnosti elaphe s napájením 48 V a dále motory 3000W, 5000W a 8000W od společnosti QS Motors. Tyto motory nám dávají požadované rozpětí výkonů při jejich využití ve dvou či čtyřech kolech elektromobilu. Použitím těchto motorů dostaneme vozidlo s výkony od 10 do 32 kW.

5.2 Baterie

Využijeme baterie společnosti Calb z kapitoly 4.4.

5.2.1 Zapojení baterií

Bateriové články zapojíme do série, abychom dostali napětí potřebné k napájení motorů. Zapojením paralelně se zvyšuje kapacita baterie. Vybrané baterie mají povětšinou dostatečnou kapacitu, zapojení paralelně tak nebude nutné. Při modularizaci článků musíme brát v potaz i chlazení baterií, aby pracovali při provozních teplotách. Nakonec k bateriím připojíme řídicí jednotku baterie (BMS), který monitoruje články a hlídá jejich úroveň nabití, aby byla baterie využívána co nejefektivněji a prodloužila se její životnost. BMS také vyrovnává napětí v jednotlivých člancích. Cena BMS pro podobné využití se pohybuje kolem 2500 Kč. [20]

Počet článků v motoru určuje celkovou energii baterie. Z předchozího výzkumu v bakalářské práci kolegy se osvědčila energie baterie 7,2 kWh. Budeme tedy zapojovat 15 článků do série, což nám dá výstupní napětí 48 V. Napětí pro motory poté upravíme pomocí DC-DC converteru. [20]

5.3 Počet motorů

Výhodou motorů v kolech je možnost osadit je pouze do dvou nebo do 4 kol. Motory jsme se rozhodli osadit do kol podle jejich výkonu. Nejslabší 3000W použijeme pouze ve variantě ve všech kolech, naopak nejsilnější S400 využijeme pouze do jedné nápravy. Počet motorů můžeme vidět v tabulce 9.

Tabulka 9 Motory a baterie pro simulaci

Motor	3000W	5000W		8000W		S400 (48V)
počet	4	2	4	2	4	2
výkon	12 kW	10 kW	20 kW	16 kW	32 kW	22 kW
cena motoru	81 790 Kč	50 000 Kč	100 000 Kč	77 800 Kč	155 600 Kč	???
Baterie	B150	B150	B150	B150	B150	B150
počet článků v sérii	15	15	15	15	15	15
počet paralelních sérií	1	1	1	1	1	1
kapacita	150 Ah	150 Ah	150 Ah	150 Ah	150 Ah	150 Ah
napětí	3,2 V	3,2 V	3,2 V	3,2 V	3,2 V	3,2 V
hmotnost	44,25 kg	44,25 kg	44,25 kg	44,25 kg	44,25 kg	44,25 kg
energie [kWh]	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
cena baterie	35 110 Kč	35 110 Kč	35 110 Kč	35 110 Kč	35 110 Kč	35 110 Kč
Cena řešení s dopravou	116 900 Kč	85 110 Kč	135 110 Kč	112 910 Kč	190 710 Kč	xxx

5.4 Rozměry, hmotnost a těžiště vozidla

Vozidlo koncipujeme jako dvoumístný malý elektromobil se sedadly vedle sebe. Jeho rozměry tedy budou odpovídat přibližně rozměrům vozu smart EQ fortwo. Pro potřeby bakalářské práce budeme uvažovat těžiště vozidla uprostřed s optimálním rozložením baterií v podlaze vozu. Hmotností se budeme však blížit spíše vozidlu Renault twizy, či Citroen AML. Hmotnost pro potřeby simulace je stanovena na 450 kg bez baterií. [20]

Velikost čelní plochy automobilu je hodnota důležitá pro výpočet odporu vzduchu. Použijeme čelní plochu vozidla Smart, která je 2,06 m². [20]

Dále potřebujeme pro zjištění jízdních vlastností vzdálenost náprav od těžiště vozu. Vzhledem k určení těžiště uprostřed vozu bude tato vzdálenost stejná pro přední i zadní nápravu a bude odpovídat vozu Smart fortwo, tedy 0,9335 m. [20]

Musíme znát také moment setrvačnosti kola. Pro kolo s motorem bude tento moment samozřejmě vyšší než u kola bez motoru. Náš elektromobil bude mít kola velikosti 14". Takové kolo s brzdou váží okolo 24 kg, poloměr ráfku je 18 cm. Můžeme zjednodušeně uvažovat o kolu jako o obruči s veškerou váhou na úrovni ráfku. V tom případě je jeho moment setrvačnosti vypočítán dle vzorce

$$I = m \cdot r^2$$

$$\text{Tedy } 24 \cdot 0,18^2 = 0,776 \text{ kg/m}^2.$$

Rovnice 7 Moment setrvačnosti disku

Do kola vložíme motor, se kterým počítáme jako s homogenním válcem. Jeho moment setrvačnosti tedy spočítáme dle vzorce

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Rovnice 8 Moment setrvačnosti motoru

Vypočtené momenty setrvačnosti motorů a kol s motorem můžeme vidět v tabulce 10.

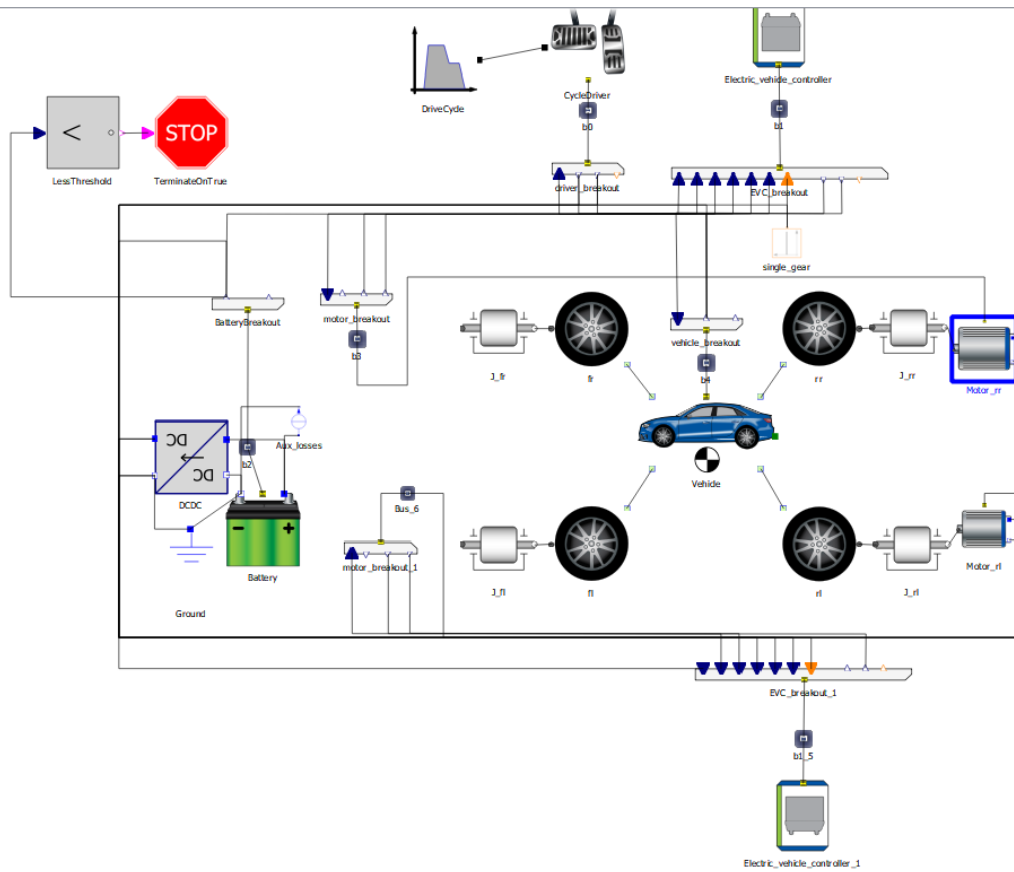
Tabulka 10 Momenty setrvačnosti motorů

motor	3000W	5000W	8000W	S400
Hmotnost [kg]	18,5	21	25	17,6
poloměr [cm]	15	15	17	17
moment setrvačnosti motoru [kg/m ²]	0,208125	0,23625	0,36125	0,25432
moment setrvačnosti kola [kg/m ²]	0,984125	1,01225	1,13725	1,03032

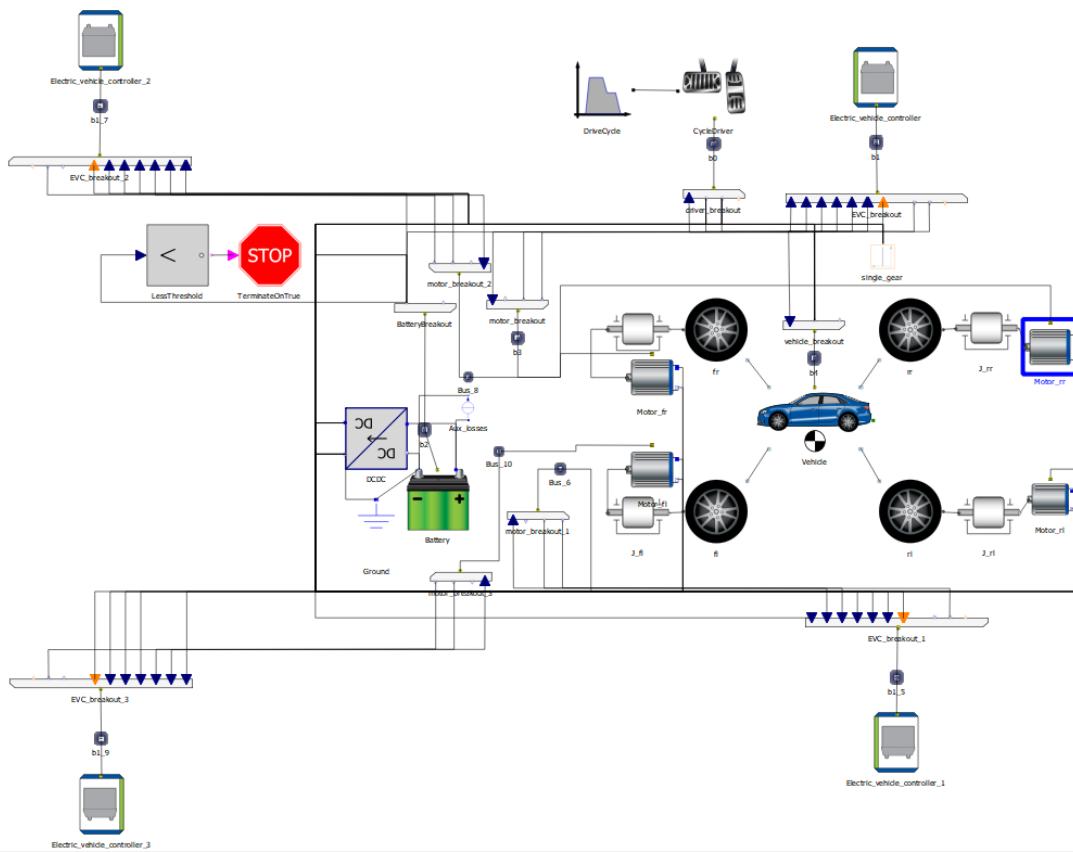
5.5 Program IGNITE

Simulace budeme provádět v programu IGNITE od společnosti Ricardo. Jedná se o program určený pro kompletní vývoj, modelování a simulaci systémů vozidel. [22]

V programu jsem vytvořil dva modely, které se liší počtem motorů. Model 1 vyobrazený na obrázku 9 je vytvořen pro elektromobil s motory ve dvou kolech s pohonem zadní nápravy. RWD jsme vybrali, protože ho využívá v takto malých elektromobilech většina automobilek a zmírňuje prokluz kol při rozjezdu u takto lehkého vozidla. Model 2 na obrázku 10 pak používáme pro simulaci AWD elektromobilu.



Obrázek 9 Model 1 s pohonem zadních kol



Obrázek 10 Model 2 s pohonem všech kol

Modely se skládají z následujících částí.

5.5.1 Jízdní cyklus

Jízdní cyklus určuje polohu vozidla. Zajímá nás dojezd vozidla při cyklu WLTC 2, který je popsán v kapitole 2.1.2. V simulaci budeme tento cyklus opakovat, než klesne napětí na baterii pod 10 %. Ujetá vzdálenost pak určuje dojezd vozidla.

5.5.2 Cycle driver

Objekt cycle driver zastupuje řidiče. Určuje akceleraci a brzdění tak, aby se blížil co nejvíce jídnímu cyklu.

5.5.3 Electric vehicle controller

Tyto články zajišťují komunikaci mezi baterií, řidičem, brzdami a motory a na základě informací od řidiče a informací o současném stavu elektromobilu vysílá pokyny k motoru a brzdám.

5.5.4 Kola

V modelu byly využity pneumatiky SimpleTyre, které ignorují prokluz kola a jejich valivý odpor je úměrný normálové síle a rychlosti BEV. Pro návrh je vybrán rozměr pneumatik 185/65 R14. Parametry pneumatik použité v simulaci jsou v tabulce 11.

Tabulka 11 Parametry pneumatik

typ	185/65 R14
Poloměr [mm]	298,45
Koef. Valivého odporu	0,01

Valivý odpor se udává na asfaltu mezi 0,01 a 0,02. Abych zjistil nejvyšší teoretický dojezd, zvolil jsem nižší z těchto variant.

V některých kolech elektromobilu jsou také uloženy motory, což ovlivňuje jejich moment setrvačnosti. Tabulka 13 ukazuje momenty setrvačností kol s různými motory.

Tabulka 12 Parametry momentu setrvačností kol

kolo s motorem	bez motoru	3000W	5000W	8000W	S400
moment setrvačnosti kola [kg/m ²]	0,776	0,984125	1,01225	1,13725	1,03032

5.5.5 Baterie

Parametry baterií zadávané do programu můžeme vidět v tabulce 13.

Tabulka 13 Parametry baterií

Motor	3000W	5000W	8000W	S400
napětí [V]	48	48	48	48
kapacita [Ah]	150	150	150	150

5.5.6 DC-DC convertor

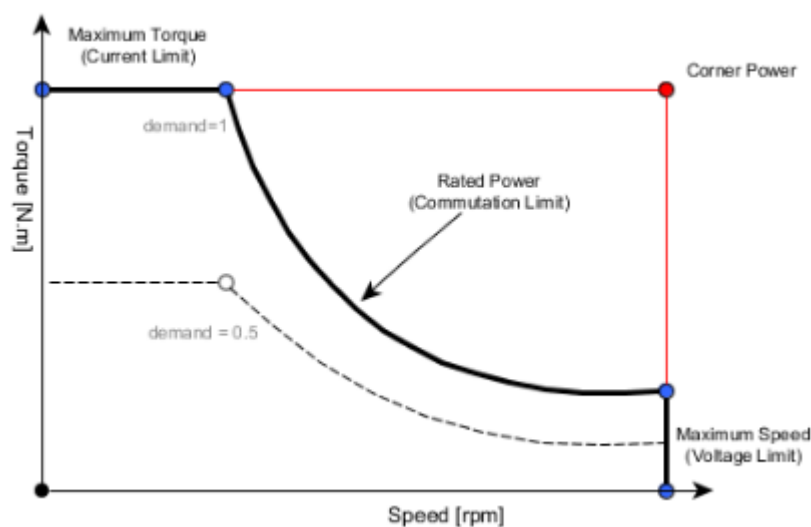
Tento prvek převádí napětí baterie na napětí vhodné pro náš elektromotor. Hodnoty zadané do simulace jsou v tabulce 14.

Tabulka 14 Parametry DC-DC convertoru

Motor	3000W	5000W	8000W	S400
Výstupní napětí	48	72	96	48

5.5.7 Elektromotor

Elektromotory v programu ignite mají jako parametry maximální výkon a maximální točivý moment. Účinnost elektromotoru jsme zadali 85 %. Jedná se o nižší hranici účinnosti udávanou výrobcí elektromotorů. Graf 3 ukazuje závislost točivého momentu na rychlosti modelu elektromotoru.



Graf 3 závislost točivého momentu na rychlosti otáčení elektromotoru

Parametry zadané do simulace můžeme vidět v tabulce 15.

Tabulka 15 Parametry motorů

model	max výkon [kW]	max točivý moment [Nm]
3000W	6	181
5000W	10	270
8000W	19	350
S400	19,5	400

5.5.8 Vozidlo

V programu budeme využívat model AdvancedVehicle, ke kterému připojíme 4 kola. Model vypočítává síly působící na vozidlo na základě

- * Zrychlení vozidla
- * Brzdných sil
- * Aerodynamického odporu vozidla
- * Práce vůči gravitaci při překonávání výškových rozdílů
- * Zátěže přípojného vozidla

Statické a dynamické rozložení hmotnosti se spočítá na základě vzdáleností těžiště od náprav.

Parametry zadané do programu můžeme vidět v tabulce 16.

Tabulka 16 Parametry AdvancedVehicle

Hmotnost vozu [kg]	494,25 + motory
čelní plocha [m ²]	2,064534
Hustota vzduchu [kg/m ³]	1,225
Vzdálenost náprav od těžiště [m]	0,9335
výška těžiště [m]	0,7
koeficient odporu vzduchu	0,24
tuhost odpružení [N/m]	63,2*(Mvoz+200)

Tuhost odpružení zjistíme z frekvence jízdy a váhy vozidla. Frekvence vozidla se nastavuje mezi 1 a 2 Hz. Tuhost pružiny pak získáme ze vzorce

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow k = (2\pi f)^2 m$$

Rovnice 9 Tuhost pružiny

Kde k je tuhost pružiny, f je frekvence vozidla nastavená na 2 Hz a m je hmotnost podporovaná daným kolem, tedy v našem případě čtvrtina hmotnosti vozidla (M_{voz}) s pasažéry, neboť uvažujeme těžiště vozu uprostřed. Do hmotnosti započítáme dva pasažéry o hmotnosti 100 kg. Do simulace vynásobíme hmotnost koeficientem 1,6 z bezpečnostních důvodů. Tedy

$$k = 158 * (M_{\text{voz}} + 200)/4 * 1,6 \Rightarrow k = 63,2 * (M_{\text{voz}} + 200 \text{ kg})$$

Rovnice 10 Koeficient pro tuhost pružiny

5.6 Simulace

Simulace provádím v modelech 1 a 2. V každém modelu mám 3 druhy motorů, které jsou označeny jako case1, case2 a case3. Matice hodnot v simulacích můžeme vidět v tabulce 17. Celkový výkon vozů je pak v tabulce 18.

Tabulka 17 Simulované vozy

Model	počet motorů	Case	Motor	Baterie	Elektromotor		Baterie		Hmotnost vozidla [kg]
					Výkon [kW]	Točivý moment [Nm]	Kapacita [Ah]	Napětí [V]	
1	2	Case 1	5000W	B105	10	270	150	48	536,25
		Case 2	8000W	B105	19	350	150	48	544,25
		Case 3	S400	B105	19,5	400	150	48	529,45
2	4	Case 1	3000W	B105	6	181	150	48	568,25
		Case 2	5000W	B105	10	270	150	48	578,25
		Case 3	8000W	B105	19	350	150	48	594,25

Tabulka 18 Výkon a točivý moment simulovaných vozů

model-case	Motor	výkon EV [kW]	max výkon EV [kW]	točivý moment EV [Nm]
1-Case 1	2x5000W	10	20	540
1-Case 2	2x8000W	16	38	700
1-Case 3	2xS400	22	39	800
2-Case 1	4x3000W	12	24	724
2-Case 2	4x5000W	20	40	1080
2-case 3	4x8000W	32	76	1400

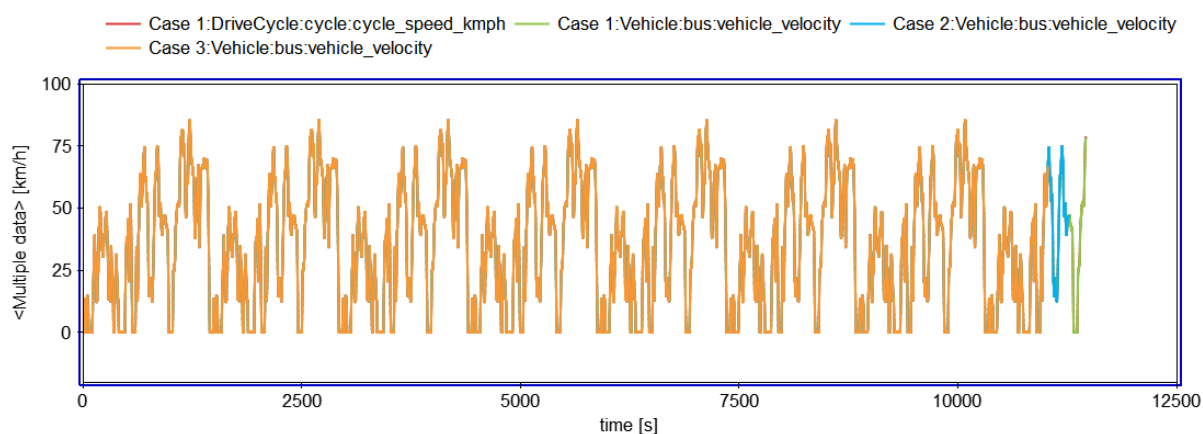
6 Výsledky

Výsledky simulace jsou zobrazeny v programu R-Post. Tento program nabízí grafy ze všech prvků a měřených veličin modelů. V této bakalářské práci se zabýváme především dojezdem a cenou daných řešení.

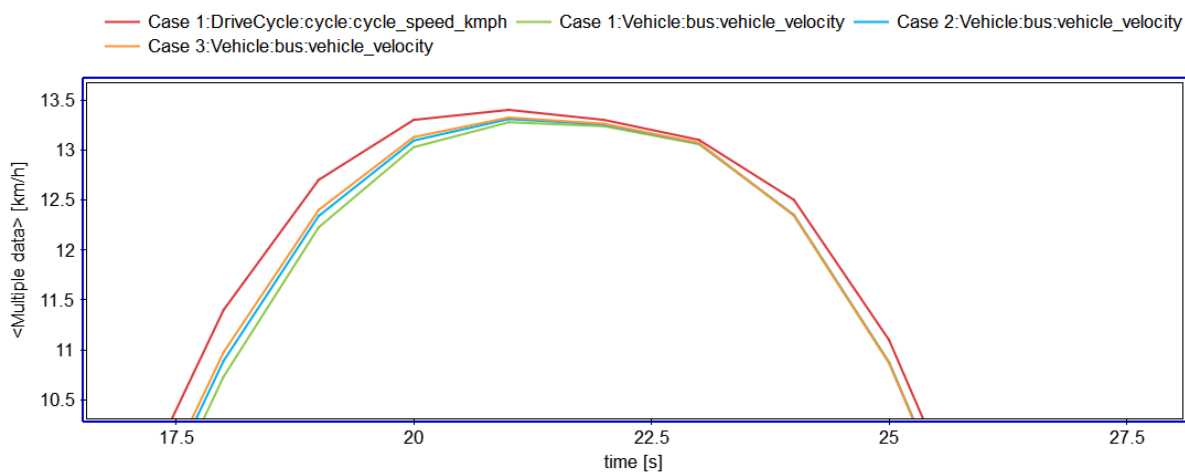
6.1 Dojezd vozidel

Dojezd jsme měřili pomocí cyklů WLTC 2 poskládaných za sebou. Baterie byla na začátku nabitá na 100% a během testu klesla až k 10% stavu nabití, kdy se simulace přerušila. Výsledná ujetá vzdálenost odpovídá dojezdu vozidla. Výsledky pro různé typy motorů byly následně vyhodnoceny a byla vybrána nejvhodnější varianta. Rozhodujícím faktorem byla kromě dojezdu také cena daného řešení.

Graf rychlostí vozidel a jízdního cyklu je vyobrazen v grafu 4. Elektromobil kopíruje cyklus WLTC 2 natolik, že se hodnoty překrývají. Zvětšená verze grafu zobrazuje mírné odchylky od cyklu v grafu 5. Grafy jsou velmi podobné pro oba modely.



Graf 4 WLTC a rychlost vozidel model 2



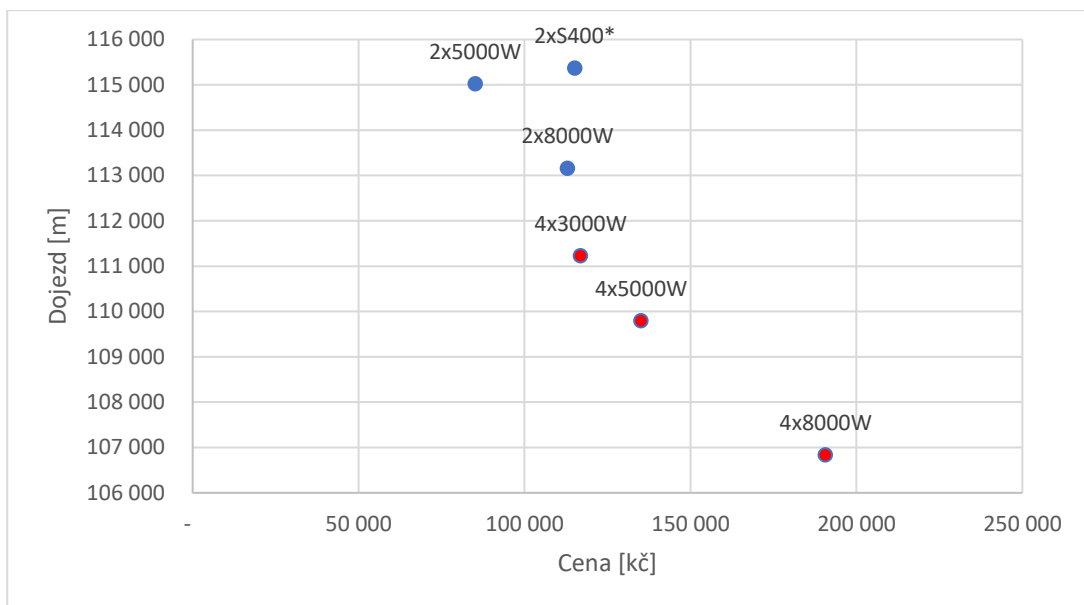
Graf 5 Odchylky od WLTC model 1

V tabulce 19 můžeme vidět ceny a dojezdové vzdálenosti všech variant motorů.

Tabulka 19 Cena a dojezd variant

Model-case	Motory	cena powertrain [kč]	dojezd [m]
1-case 1	2x5000W	85 110	115 023
1-case 2	2x8000W	112 910	113 156
1-case 3	2xS400*	115 110	115 367
2-case 1	4x3000W	116 900	111 226
2-case 2	4x5000W	135 110	109 791
2-case 3	4x8000W	190 710	106 838

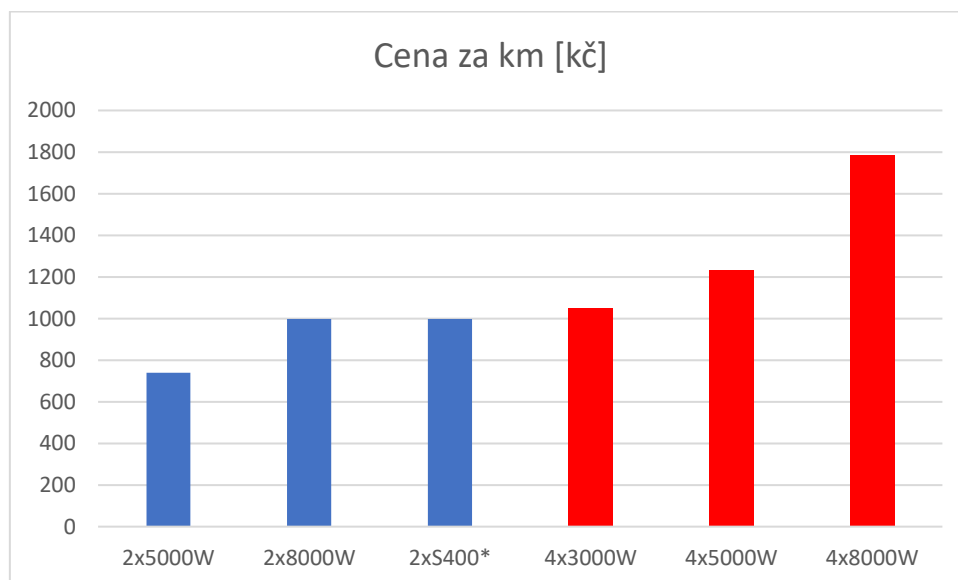
Data jsou pro přehlednost zobrazena také v grafu 6.



Graf 6 Dojezd/Cena variant

- * Motor S400 nemá veřejně dostupné informace o ceně a nedopověděli na emaily zasláné v rámci této bakalářské práce. Předpokládáme tedy cenu srovnatelnou s motorem 8000W od výrobce QSMotor, ale vzhledem k tomu, že QSMotor je čínský výrobce a Elaphe je slovinská firma, dá se tak předpokládat, že cena bude vyšší.

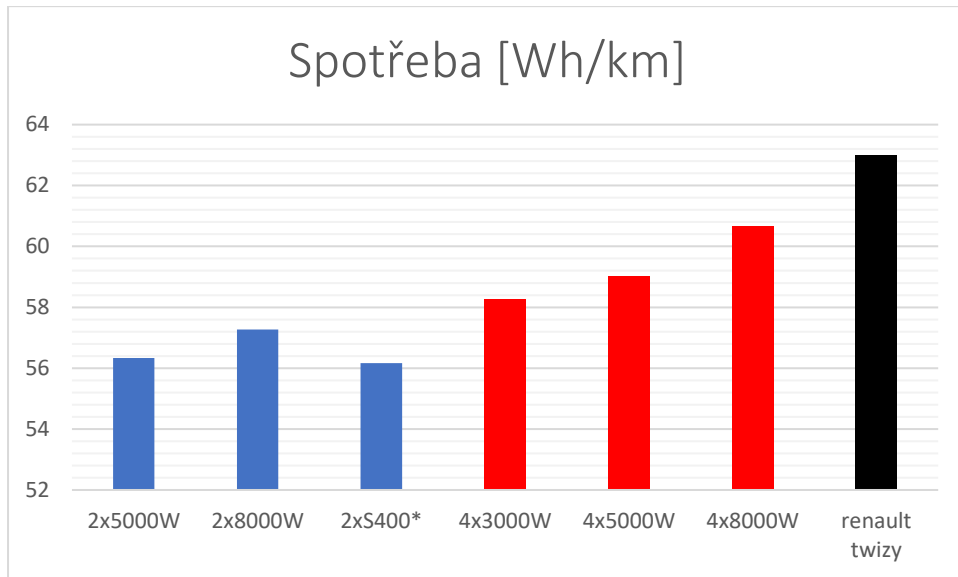
V grafu 7 můžeme vidět cenu za kilometr dojezdu jednotlivých variant.



Graf 7 Cena za kilometr

6.2 Spotřeba vozidel

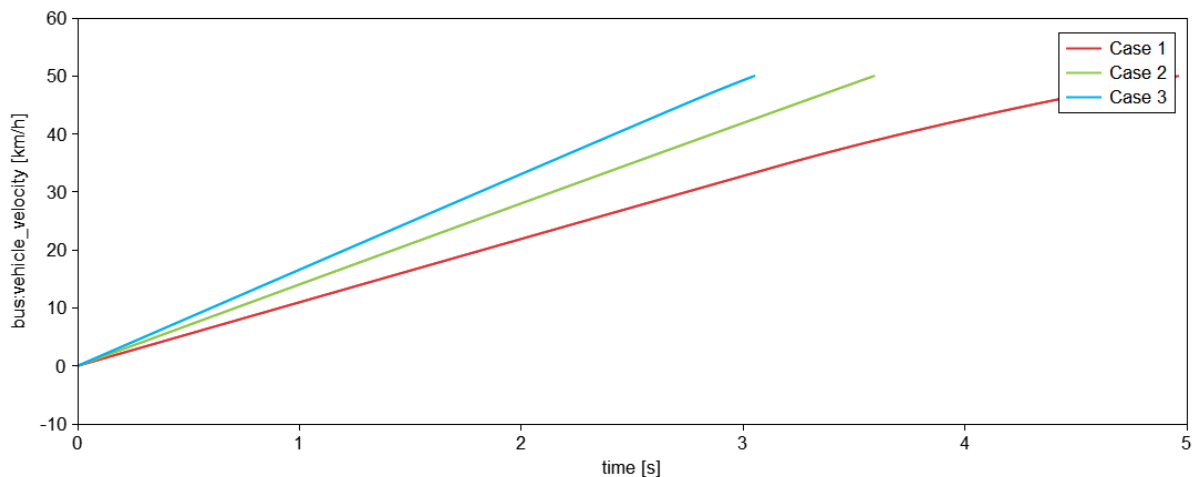
Spotřeba vozidel v porovnání s vozem Renault Twizy je uvedena v grafu 8.



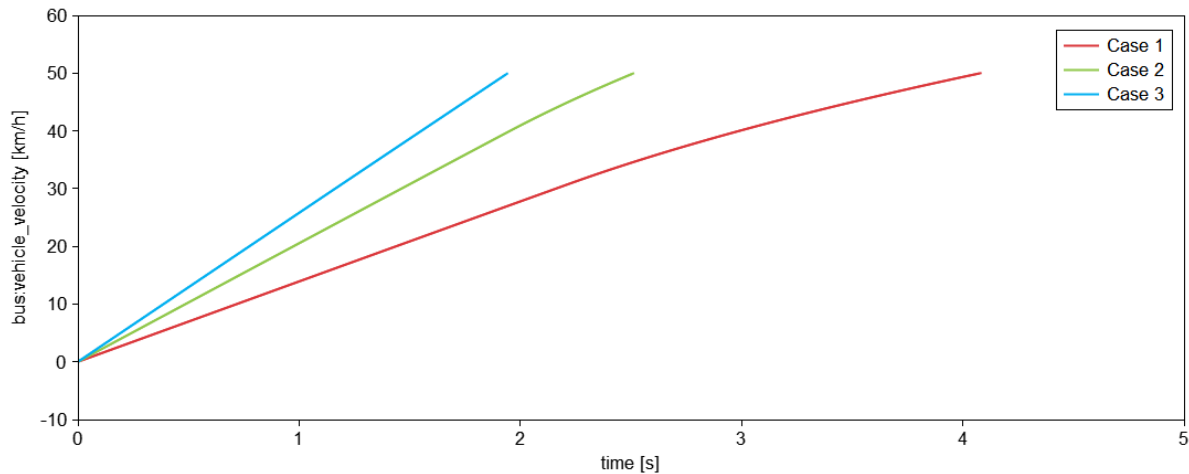
Graf 8 Spotřeba vozidel

6.3 Rozjezdová charakteristika

Pro zjištění rozjezdové charakteristiky byly modely upraveny. Jízdní cyklus byl odstraněn a řidič byl nahrazen hodnotami pro tzv. „open throttle“, Brzda má vstup 0%, plyn pak 100%. V grafu 9 vidíme rozjezdové charakteristiky z rychlosti 0 km/h do rychlosti 50 km/h pro elektromobily se dvěma motory. Graf 10 zobrazuje tyto charakteristiky pro model 2, tedy elektromobily s motory ve všech kolech. Data o zrychlení z 0 na 50 km/h pro všechny varianty jsou uvedena také v tabulce 20.



Graf 9 0-50 km/h rozjezdová charakteristika model 1



Graf 10 0-50 km/h rozjezdová charakteristika model 2

Tabulka 20 Zrychlení 0-50 km/h

Model-Case	motory	zrychlení 0-50 km/h [s]
1-case 1	2x5000W	4,95
1-case 2	2x8000W	3,59
1-case 3	2xS400	3,05
2-case 1	4x3000W	4,07
2-case 2	4x5000W	2,5
2-case 3	4x8000W	1,94

6.4 Vyhodnocení

Nejvýhodnější variantou dle pořizovací ceny je model 1 case 1, se dvěma motory 5000W s dojezdem 115 km a cenou za kilometr dojezdu 740 Kč. Všechny varianty kromě varianty 4x8000W jsou pak z hlediska ceny na km konkurenceschopné variantám v bakalářské práci kolegy s motorem uprostřed vozidla [20]. Varianta 4x8000W je pak příliš nákladná. Z hlediska celkové pořizovací ceny je jediná varianta 2x5000W srovnatelná s cenami elektromobilů s běžným pohonem. Ostatní varianty jsou o 20-100% dražší.

Nejnižší spotřebu z použitých variant vykazují motory S400, které těsně porazily motory 5000W. Varianta s těmito motory je zároveň nejvýkonnější variantou se dvěma motory a druhou nejvýkonnější celkově. tvoří tedy odchylku od trendu snižování dojezdu se zvyšujícím se výkonem. Tato varianta je proto za předpokladu rozumné ceny zajímavá.

Všechny kombinace mají spotřebu nižší než Renault Twizy. Toto se dá vysvětlit zjednodušením powertrainu a snížením ztrát viz kapitola 3.2.9. Nejvyšší rozdíl je mezi Renaultem Twizy (63 Wh/km) a variantou 2xS400 (56,17 Wh/km) popřípadě 2x5000W (56,33 Wh/km), tedy snížení spotřeby o 11 %.

Pro uskutečnění návrhu je vybrán pohon se dvěma motory 5000W od firmy QS Motor. Elektromobil má dojezd 115 km a maximální rychlost 90 km/h. Tyto hodnoty jsou dostačující, jelikož elektromobil je určen pro studentský carsharing v městském provozu. Celková cena powertrainu činí 85 110 Kč. Cena za kilometr dojezdu je pak 740 Kč. Výkon vozidla činí 10 kW a je napájeno baterií o kapacitě 150 Ah při 48 V tedy s výslednou energií 7,2 kWh. Celková hmotnost vozidla činí 536,25 kg a vozidlo se dostane na rychlost 50 km/h za 4,95 vteřin.

Výsledný elektromobil nejlépe kopíruje hodnoty elektromobilu Renault Twizy z našeho průzkumu. Náš elektromobil má nižší výkon, ale vyšší energii baterie i dojezd. Snížení dojezdu je možné snížením počtu článků baterie. Výkon můžeme zvýšit osazením silnějších motorů, popřípadě osazením motorů do všech kol jako v modelu 2. Tím se ale samozřejmě zvýší i cena.

7 Závěr

V této bakalářské práci byl vytvořen návrh elektrického pohonu malého městského vozidla s motory v kolech. Návrh byl vytvořen na základě aktuálně vyráběných vozidel dostupných na českém trhu.

V úvodu byly popsány důvody pro vznik této bakalářské práce a pro elektromobilitu jako takovou, byl popsán princip carsharingu, pro který se bude navrhované vozidlo využívat. Dále byla popsána legislativa a kroky vlády pro usnadnění přechodu na elektromobily v České republice i ve světě. Byly popsány jízdní cykly, které se dnes používají pro testování dojezdu i spotřeby automobilů, hlavní byl cyklus WLTC, který se využíval v této bakalářské práci.

V následující kapitole byly popsány baterie a vytvořena tabulka jejich základních parametrů, které je potřeba brát v potaz při návrhu elektromobilu.

Značnou část bakalářské práce tvořil popis technologií elektromotorů a vysvětlení principu jejich funkce a rozdílů. Jejich typy, účinnost, použití a následný popis elektromotoru v kole se zaměřením na odchylky od klasických elektromobilů, výhody a nevýhody této varianty oproti klasickému elektromobilu.

Následovala hlavní část bakalářské práce, tedy průzkum trhu. V rámci průzkumu trhu byly vybrány malé elektromobily, které se v současné době prodávají na českém trhu, pro porovnání s navrhovaným vozidlem. Elektromobil měl rozměry odpovídat automobilu Smart ForTwo a hmotností přibližně vozů Renault Twizy. Pokud by bylo třeba modelovat elektromobil s motory v kolech s jinými rozměry či hmotností, jde pouze o jednoduchou výměnu parametrů v rámci vytvořeného modelu a simulaci je možné provést s novými

parametry. Dále byl proveden průzkum elektromobilů s elektromotory v kolech. V současné době sice není možnost takový elektromobil na trhu koupit, ale byly popsány alespoň některé koncepty. Další částí průzkumu byly samotné elektromotory. Byly popsány elektromotory od třech výrobců, kteří se těmito komponenty zabývají. Většina elektromotorů byla pro naše potřeby příliš výkonná, jelikož se firmy zabývaly výrobou elektromotorů pro větší vozidla, kde jsou vyšší zisky. Nakonec byly vybrány elektromotory od firmy QS Motor, která se zabývá výrobou elektromotorů v kolech pro motocykly a mají tak v oboru zkušenosti, jelikož trh elektrických skútrů s motory v kolech se na rozdíl od automobilů již několik let rozvíjí a rozváží produkty po celém světě. K porovnání byl také vybrán jeden motor slovenské společnosti elaphe, která bohužel neudává cenu svých motorů a neodpověděla na email zasláný v rámci průzkumu k bakalářské práci. Baterie pro potřeby bakalářské práce byly vybrány na základě kolegy, který dělal bakalářskou práci na elektromobil s centrálním motorem.

Následoval návrh vozidla, kde byly z dostupných komponentů vybrány nejvhodnější pro simulaci. V programu IGNITE byly vytvořeny dva modely pro simulaci vozidla se dvěma a čtyřmi motory. Celkem bylo provedeno 6 simulací různých konfigurací a výsledky těchto simulací byly popsány ve vyhodnocení. Na základě těchto výsledků byla vybrána nejlepší varianta pro pohon malého městského elektromobilu na základě dojezdu, ceny, spotřeby a ceny za km. Výsledným pohonem navrženým touto bakalářskou prací byl pohon z modelu 1 case 1 se dvěma motory o výkonu 5 kW, baterií s energií 7,2 kWh a dojezdem 115 km. Na bakalářskou práci plánuji navázat v magisterském studiu diplomovou prací na téma torque vectoring pomocí elektromotorů v kolech.

Použité zdroje

- 1 DVOŘÁK, František. *Evropská komise má plán boje s emisemi: spalovací motory skončí v roce 2035* [online]. 14. 7. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/emise-automobilky-evropa-co2.A210714_080851_automoto_fdv
- 2 TISEO, Ian. Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2020, by subsector. *Statista* [online]. 9. 11. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>
- 3 TISEO, Ian. World carbon dioxide emissions in 2018, by sector: (in million metric tons of carbon dioxide). *Statista* [online]. 16. 6. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/276480/world-carbon-dioxide-emissions-by-sector/>
- 4 EPA. *All-Electric Vehicles* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>
- 5 EVROPSKÁ KOMISE. *Zelená dohoda pro Evropu: Snaha stát se prvním klimaticky neutrálním kontinentem* [online]. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs
- 6 THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCE. *Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2019* [online]. 9. 10. 2019 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>
- 7 EVROPSKÁ KOMISE. *Doprava a Zelená dohoda: Efektivní a bezpečná doprava šetrná k životnímu prostředí* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport-and-green-deal_cs
- 8 VOLKSWAGEN GROUP. *NEW AUTO: Volkswagen Group set to unleash value in battery-electric autonomous mobility world* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/new-auto-volkswagen-group-set-to-unleash-value-in-battery-electric-autonomous-mobility-world-7313>
- 9 MINISTERSTVO DOPRAVY, *Dobíjecích stanic na elektromobily přibývá. Ministr Havlíček spustil další v Nymburce* [online]. 3. 5. 2021 [cit. 2021-11-12], dostupné z:

- <https://www.mdcz.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Dobijecich-stanic-na-elektromobily-pribyva-Minist>
- 10 LARMINIE, James a John LOWRY. *Electric vehicle technology explained*. 2nd ed. Chichester: John Wiley, c2012. ISBN 978-111-9942-733.
 - 11 ACEA. Fuel types of new cars: battery electric 7.5%, hybrid 19.3%, petrol 41.8% market share in Q2 2021. *Acea: driving mobility for europe* [online]. 23. 7. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-7-5-hybrid-19-3-petrol-41-8-market-share-in-q2-2021/>
 - 12 SRB, Luboš. Dotace na elektromobily v roce 2021 v ČR pravděpodobně nebudou. *Elektrické vozy* [online]. 15. 2. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/dotace-na-elektromobily-v-roce-2021-v-cr-pravdepodobne-nebudou>
 - 13 SRB, Luboš. Vše, co potřebujete vědět o parkování elektromobilů v Praze zdarma. *Elektrické vozy* [online]. 26. 8. 2020 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/vse-co-potrebuje-vedet-o-parkovani-elektromobilu-v-praze-zdarma>
 - 14 JOHNSON, Erik. Introduction to Electric Vehicle Battery Systems. *All about circuits* [online]. 31. 7. 2019 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-electric-vehicle-battery-systems/>
 - 15 CROSSE, Jesse. Under the skin: the hierarchy of EV motor technology. *Autocar* [online]. 29. 4. 2019 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/under-skin-hierarchy-ev-motor-technology>
 - 16 EVROPSKÁ KOMISE. *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2019/1781* [online]. 25. 10. 2019 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj>
 - 17 FIAT. *WLTP a RDE: nové testy pro certifikaci spotřeby paliva, emisí CO₂ a znečišťujících látek* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.fiat.cz/test-wltp>
 - 18 DMITRYKO. WLTC driving cycle for Class 2 vehicles (22 < PWr <= 34) [online]. 27. 8. 2012 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure#/media/File:WLTC_class_2.svg

- 19 EVROPSKÁ KOMISE. *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2018/1832* [online]. 27.11.2018 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1832/oj>
- 20 BOŠEK, František. Návrh pohonu malého elektrického městského vozidla pro carsharing v Praze. Praha, 2020. Bakalářská práce. Fakulta Dopravní ČVUT. Vedoucí práce Ing. Dmitrij Rozhdestvenski, Ph.D.
- 21 MAN. *METODIKA MĚŘENÍ EMISÍ WLTP* [online]. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.man.eu/cz/cz/general/wltp.html>
- 22 RICARDO, s.r.o. *IGNITE User Manual* [Online]. Dostupné z: <https://docs.ricardo-ignite.com/>
- 23 FDRIVE. *Renault Twizy* [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/katalog/renault-twizy/specifikace>
- 24 EPA. *EPA Emission Standards for Light-Duty Vehicles and Trucks and Motorcycles* [online]. 9. 11. 2021 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and>
- 25 PETR, Tomáš. *MECHANICKÉ ZTRÁTY HNACÍHO ÚSTROJÍ AUTOMOBILŮ* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/17304/Mechanick%C3%A9%20ztr%C3%A1ty%20hnac%C3%ADho%20%C3%BAstroj%C3%AD.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
- 26 PROTEAN. *DRIVING THE FUTURE OF ELECTRIC VEHICLES* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/>
- 27 REDAKCE NALEZENO.CZ. *Motor v kolech. Je ideálním řešením pro elektromobily?* [online]. 16. 7. 2012 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/technologie-1/hybridy-a-elektromobily/motor-v-kolech-je-idealnim-resenim-pro-elektromobily.aspx>
- 28 ROAD SAFETY FACTS. *ABS: WHAT ARE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEMS AND HOW DO THEY WORK?* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://roadsafetyfacts.eu/abs-what-are-anti-lock-braking-systems-and-how-do-they-work/>

- 29 *Comparison of Braking Performance by Electro-Hydraulic ABS and Motor Torque Control for In-wheel Electric Vehicle*. 2013. Barcelona, Spain: World Electric Vehicle Journal, 2013. ISSN 2032-6653. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/6/1/186/pdf>
- 30 CAREY, John. *Why don't EVs have four in-wheel motors?* [online]. 26. 2. 2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://evcentral.com.au/why-dont-evs-have-four-in-wheel-motors/>
- 31 RENAULT GROUP. *THE RENAULT ZOE MOTOR: ENERGY EFFICIENCY AND POWER!* [online]. 8.3.2021 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-renault-zoe-motor-energy-efficiency-and-power/>
- 32 RENAULT GROUP. *Z.E. 50: THE SECRETS OF THE NEW ZOE'S BATTERY* [online]. 13. 9. 2019 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/z-e-50-the-secrets-of-the-new-zoes-battery/>
- 33 EVSPECIFICATIONS. *2020 Opel Corsa-e Edition: Specifications and price* [online]. [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.evspecifications.com/en/model/4ef9be>
- 34 MÁRA, Ondřej. *Nový Citroën Ami jako slibovaný nástupce C1? K řízení ani nepotřebujete řidičák.* *Auto.cz* [online]. 28. 2. 2020 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/novy-citroen-ami-jako-slibovany-nastupce-c1-k-rizeni-ani-nepotrebuje-ridicak-133482>
- 35 EVSPECIFICATIONS. *2019 BMW i3 42 kWh: Specifications and price* [online]. [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.evspecifications.com/en/model/cd6382>
- 36 MW MOTORS. *Luka EV in-wheel* [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://mwmotors.cz/luka-ev/?lang=cs>
- 37 MW MOTORS. *Luka EV traditional* [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://mwmotors.cz/luka-ev-traditional/?lang=cs>
- 38 MW MOTORS. *MWM SPARTAN V LPG VERZI & LUKA EV* [online]. 31. 5. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://mwmotors.cz/2021/05/20/mwm-spartan-v-lpg-verzi-luka-ev/?lang=cs>

- 39 LIGHTYEAR. *Lightyear selects Valmet Automotive for the production of Lightyear One* [online]. 19. 7. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://lightyear.one/press-releases/lightyear-selects-valmet-automotive-for-the-production-of-lightyear-one>
- 40 LIGHTYEAR. *Lightyear's technology – sustainable and scalable*. [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://lightyear.one/technology>
- 41 LIGHTYEAR. *Reserve your Lightyear One and become one of the 946 pioneers* [online]. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://lightyear.one/reserve>
- 42 MOMENTUM GROUPS. *Pre-Order Lordstown Endurance Electric Pickup Truck for Fleets* [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.momentumgroups.com/lordstown-endurance-electric-pickup-truck#LordstownEnduranceform>
- 43 ELAPHE. *Lordstown “Endurance” – The World’s First All-Electric Commercial Pickup Truck* [online]. 3. 3. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <http://in-wheel.com/en/news/lordstown-endurance-the-worlds-first-all-electric-commercial-pickup-truck/>
- 44 ELAPHE. *Direct-drive in-wheel motors* [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <http://in-wheel.com/en/solutions-2/direct-drive-in-wheel-motors/>
- 45 CHRISTENSEN, Lowel. *Designing In-Hub Brushless Motors* [online]. 22. 6. 2014 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21833665/designing-inhub-brushless-motors>
- 46 PROTEAN. *Pd18 Datasheet* [online]. leden 2020 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/f/2020/02/ProteanDrive%C2%AE-Pd18-Product-Data-Sheet-2020.pdf>
- 47 PROTEAN. *ProteanDrive* [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.proteanelectric.com/technology/>
- 48 ZOIA, David E. *Developer Protean Says In-Wheel Electric Motors Nearing Production*. *WardsAuto* [online]. 17. 4. 2013 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/sae-world-congress/developer-protean-says-wheel-electric-motors-nearing-production>

- 49 EVSPECIFICATIONS. *2020 smart EQ fortwo coupé - Specifications and price* [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.evspecifications.com/en/model/9119d7>
- 50 AIXAM. *AIXAM ECITY PACK* [online]. 2021 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.aixam.cz/cs/e-city/pack#documents>
- 51 QS Motor 5000W 260 V4 72v 90kph 2wd BLDC brushless electric car hub motor conversion kits for ATV car. *Aliexpress* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000927850547.html?spm=a2g0o.store_pc_groupList.8148356.7.14654375SibyqC
- 52 QS Motor 8000W 273 96V 115kph 72V 95kph 48V 67kph 2wd BLDC brushless electric car hub motor conversion kits with APT96600 motor. *Aliexpress* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000814090206.html?spm=a2g0o.store_pc_groupList.8148356.1.7ef67207lvegmV
- 53 RENAULT GROUP. *Renault TWIZY* [online]. duben 2018 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://cdn.group.renault.com/ren/cz/pdf/brochures/twizy-brochure.pdf>
- 54 QS Motor 3000W 205 V3 2wd 72v 90kph BLDC Electric Car Hub Motor Conversion Kits for Golf Car Electirc Light Car. *Aliexpress* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000966499910.html?spm=a2g0o.store_pc_groupList.8148356.3.254e31478CFLsw
- 55 MALIK, Sidharth. TORQUE VECTORING DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLES. *Modelon* [online]. 28. 10. 2021 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://www.modelon.com/torque-vectoring-design-for-electric-vehicles/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma stejnosměrného kartáčového motoru [10]	16
Obrázek 2 Schéma bezkartáčového stejnosměrného motoru [10]	17
Obrázek 3 Schéma spínaného reluktančního motoru [10].....	18
Obrázek 4 Různé možnosti uspořádání motoru v kole [45]	24
Obrázek 5 Základní schéma elektromobilu s baterií [10].....	27
Obrázek 6 Schéma BEV s motory v kolech [47].....	28
Obrázek 7 Elektromotory elaphe [44].....	31
Obrázek 8 Kolo s elektromotorem Protean [46].....	32
Obrázek 9 Model 1 s pohonem zadních kol	37
Obrázek 10 Model 2 s pohonem všech kol	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání WLTP a NEDC [17]	12
Tabulka 2 Základní parametry baterií.....	14
Tabulka 3 Minimální účinnosti indukčního motoru IE4 [16].....	22
Tabulka 4 Parametry malých elektromobilů	30
Tabulka 5 Parametry motorů elaphe	31
Tabulka 6 Parametry motorů Protean	32
Tabulka 7 Parametry motorů QS Motor	33
Tabulka 8 Parametry bateriového článku Calb.....	33
Tabulka 9 Motory a baterie pro simulaci.....	35
Tabulka 10 Momenty setrvačnosti motorů.....	36
Tabulka 11 Parametry pneumatik	38
Tabulka 12 Parametry momentu setrvačností kol	38
Tabulka 13 Parametry baterií	39
Tabulka 14 Parametry DC-DC convertoru.....	39
Tabulka 15 Parametry motorů.....	39
Tabulka 16 Parametry AdvancedVehicle	40
Tabulka 17 Simulované vozy	41
Tabulka 18 Výkon a točivý moment simulovaných vozů.....	41
Tabulka 19 Cena a dojezd variant.....	42
Tabulka 20 Zrychlení 0-50 km/h.....	45

Sezam grafů

Graf 1 WLTC 2 [18].....	13
Graf 2 Ovládání stejnosměrného kartáčového motoru [10]	17
Graf 3 závislost točivého momentu na rychlosti otáčení elektromotoru	39
Graf 4 WLTC a rychlost vozidel model 2.....	42
Graf 5 Odchyly od WLTC model 1.....	42
Graf 6 Dojezd/Cena variant.....	43
Graf 7 Cena za kilometr	43
Graf 8 Spotřeba vozidel	44
Graf 9 0-50 km/h rozjezdová charakteristika model 1.....	44
Graf 10 0-50 km/h rozjezdová charakteristika model 2.....	45

Seznam rovnic

Rovnice 1 Ztráty mědi	20
Rovnice 2 Ztráty železa	20
Rovnice 3 Ztráty třením a odporem vzduchu.....	21
Rovnice 4 Celkové ztráty elektromotoru.....	21
Rovnice 5 Účinnost elektromotoru	21
Rovnice 6 Brzdná účinnost	23
Rovnice 7 Moment setrvačnosti disku.....	35
Rovnice 8 Moment setrvačnosti motoru	36
Rovnice 9 Tuhost pružiny	40
Rovnice 10 Koeficient pro tuhost pružiny	40