

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Energetická náročnost individuální automobilové dopravy

Jan Novotný

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Novotný**
Osobní číslo: **D11731**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení v dopravě**
Název tématu: **Energetická náročnost individuální automobilové dopravy**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

Výpočtový model spotřeby benzínu osobního automobilu
Výpočtový model spotřeby elektrické energie elektromobilu
Validace vypočtených hodnot
Požadavky na nabíjení elektromobilu

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Douda, Heptner, Kolář: Pozemní dopravní prostředky (ČVUT 2009)
časopis Perspektivy elektromobility II (příloha časopisů Elektro a Automa 2013)
Pohl, J. : Základy trakční mechaniky, přednášky
Sodomka, T. Energetická náročnost železniční dopravy ve spojení Evropa - Asie,
DP, 2011/2012 <http://www.hybrid.cz>

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **13. prosince 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30. května 2014**



doc. Ing. Ivo Drahošský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. dubna 2014

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Prohlašuji,

že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2014

Jan Novotný

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Radovanovi Dolečkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Pohlovi za jejich odborné a cenné rady při tvorbě bakalářské práce a také za jejich vstřícný přístup a pomoc při řešení problémů. Rád bych poděkoval i své rodině za podporu v ne vždy snadných situacích při studiu.

ANOTACE

Práce se zabývá komplexním porovnáním parametrů vozidel poháněných spalovacím motorem a motorem elektrickým. Na začátku práce jsou zmíněny vlastnosti obou typů motorů a stručně jejich výhody i nevýhody. Dále jsou pro verzi s elektrickým motorem popsány různé koncepce uspořádání pohonu. V souvislosti s teoretickým základem pro elektromobily jsou zde uvedeny možnosti dobíjení akumulátorových baterií a také cíle elektromobility. Další kapitola je věnována výpočtovému modelu vozidla poháněného spalovacím motorem. Zde se práce zabývá výpočtem jízdních odporů a následným vlivem těchto odporů na trakční vlastnosti vozidla. Je zde také popsán spalovací motor pomocí charakteristik (momentová, trakční, atd.). V závěru kapitoly je vypočítána energetická náročnost provozu automobilu. Další kapitola práce se zabývá výpočtovým modelem elektromobilu. Je zde popsána teoretická přestavba automobilu na elektromobil a její dopad na hmotnost vozidla, potažmo i na trakční vlastnosti a dojezd. V závěru kapitoly je vypočtena energetická a ekonomická náročnost elektromobilu. Poslední kapitola komplexně porovnává oba pohony. Je zde provedeno porovnání zrychlení a trakčních charakteristik, srovnání ekonomických nároků na provoz vozidel a energetická náročnost je zde porovnána komplexně pro oba pohony a to od těžby primárních zdrojů, až po přenos síly na vozovku. Porovnána je zde také problematika znečištění ovzduší oběma typy pohonů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromobil, automobil, energetická náročnost, dobíjení, akumulátorová baterie, jízdní odpor, charakteristika, emise, elektrárna

TITLE

The energy performance of individual car transport

ABSTRACT

The bachelor's thesis is the completely comparing parameters of vehicles powered by an internal combustion engine and an electric engine. The first part of this thesis describes the properties of both types of engines and their advantages and disadvantages. In the next part thesis analyses a various types of propulsion for electric engines and possibilities charging the batteries and objectives of electromobility. The second chapter works with a mathematics model of vehicle with internal combustion engine and the size of waveforms

driving resistances, which affect the traction properties of vehicle. Author describes internal combustion engine with using torque characteristics and traction characteristics and he calculates the energy performance of operation the car. The third chapter works with a mathematics model of vehicle with electric engine. Chapter contains describe theoretical conversion from vehicle with internal combustion engine to vehicle with electric engine and impact of this conversion to weight of the vehicle and his traction properties. Author calculates the energy performance of operation the electric car. In the final chapter, author compares a both of types of engines. He presents the comparison of acceleration cars, traction characteristics and the economic requirements for vehicles. For a both types of engine, the energy performance is calculated completely from power generation to power transmission on road. And on the end, author compared changes in the production of CO₂ for this engines.

KEYWORDS:

Electric car, vehicle, the energy performance, charging, battery, driving resistances, characteristics, emissions, power plant

OBSAH

Úvod	10
1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	11
1.1 Uvažované pohony vozidla	11
1.1.1 Vozidlo s pohonem využívající zážehový spalovací motor.....	11
1.1.2 Pohon vozidla využívající elektromotor	11
1.2 Akumulátorové baterie	13
1.2.1 Požadavky na dobíjení elektromobilu.....	15
1.3 Cíle elektromobility	16
2 Výpočtový model vozidla se spalovacím motorem.....	19
2.1 Volba vozidla	19
2.2 Základní parametry vozidla.....	19
2.3 Charakteristiky spalovacího motoru	20
2.4 Jízdní odpory	23
2.4.1 Aerodynamický odpor	23
2.4.2 Valivý odpor	24
2.4.3 Odpor setrvačnosti	26
2.4.4 Odpor stoupání.....	26
2.4.5 Celkový odpor působící na vozidlo	27
2.5 Zrychlení vozidla	28
2.6 Výpočet energetické náročnosti vozidla se spalovacím motorem	30
2.7 Validace hodnot	32
3 Výpočtový model vozidla s elektromotorem	34
3.1 Přestavba na elektrický pohon	34
3.1.1 Akumulátorová baterie	35
3.1.2 Elektrický pohon.....	35
3.2 Charakteristiky elektromotoru	37
3.2.1 Momentová charakteristika.....	37
3.2.2 Trakční charakteristika	38
3.3 Jízdní odpory	38
3.4 Zrychlení	39
3.5 Výpočet energetické náročnosti provozu elektromobilu.....	41
4 Porovnání pohonů.....	43
4.1 Charakteristiky motorů.....	43
4.1.1 Momentová charakteristika.....	43
4.1.2 Trakční charakteristika	43
4.2 Jízdní odpory.....	44
4.3 Zrychlení	46

4.4	Účinnost vozidel.....	46
4.5	Ekonomická náročnost provozu.....	48
4.5.1	Náklady na údržbu.....	48
4.5.2	Náklady na energii (palivo).....	49
4.5.3	Celkové náklady na provoz.....	50
4.6	Dojezd vozidel.....	51
4.7	Celková energetická náročnost.....	52
4.7.1	Vozidlo se spalovacím motorem.....	53
4.7.2	Vozidlo s elektrickým motorem.....	54
4.8	Produkce CO ₂	58
4.8.1	Vozidlo se spalovacím motorem.....	58
4.8.2	Vozidlo s elektrickým motorem.....	59
	ZÁVĚR.....	62
	Seznam zdrojů.....	64
	Seznam zkratk:.....	66
	Seznam obrázků.....	67
	Seznam grafů.....	68
	Seznam tabulek.....	69

ÚVOD

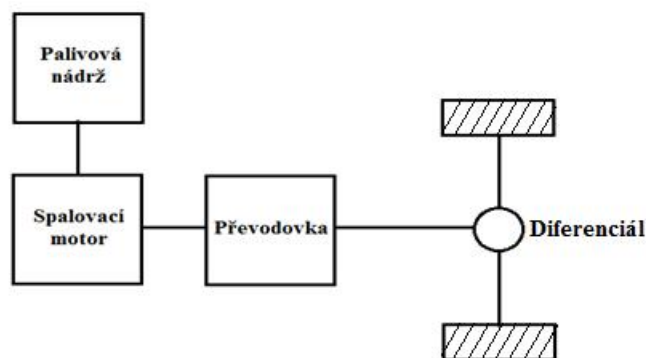
Práce se zabývá energetickou, ekonomickou a environmentální problematikou provozu vozidel poháněných zážehovým spalovacím motorem a elektromotorem. Cílem práce je, co nejkompexněji porovnat oba tyto typy vozidel. Obě vozidla mají být co možná nejkvivalentnější (výkon motoru, hmotnost, karoserie atd.), aby bylo možné provést srovnání. Porovnání je provedeno zejména z následujících pohledů. Z pohledu celkové energetické náročnosti provozu, ekonomické náročnosti provozu pro koncového uživatele, z hlediska dojezdu a disponibility a v neposlední řadě z pohledu dopadu provozu obou vozidel na životní prostředí. Pro porovnání je zvoleno konkrétní vozidlo se zážehovým spalovacím motorem a pro něho jsou také stanoveny hodnoty všech sledovaných parametrů. Následně je pro zachování co nejkvivalentnějších vlastností vozidel, provedena teoretická přestavba vozidla poháněného spalovacím motorem na vozidlo s elektrickým motorem. Pro tuto přestavbu je propočítána hmotnostní bilance a následně stanoveno do jaké míry se tato přestavba projeví na sledovaných parametrech. Po určení potřebných podkladů pro srovnání obou modelů je provedeno vyhodnocení po všech výše uvedených stránkách. Cílem práce je přinést odpovědi na otázky spojené s provozem vozidla s elektrickým pohonem a to porovnáním hmotnosti, trakčních vlastností, spotřeby energie, nákladů na energii, celkových nákladů, dojezdu, primární spotřeby energie i produkce oxidu uhličitého dvou navzájem velmi příbuzných vozidel.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Uvažované pohony vozidla

1.1.1 Vozidlo s pohonem využívající zážehový spalovací motor

Zážehový motor je spalovací motor, který při svém chodu nasává do válce směs benzínu se vzduchem, která je následně stlačena a zapálena pomocí elektrického oblouku vytvořeného zapalovací svíčkou. Zapálená směs se ve válci rozpíná a tlakem na píst motoru, tak vlastně vykonává mechanickou práci. Spalovací motor tedy slouží k přeměně chemické energie paliva na energii mechanickou. Při zapálení směsi je samozřejmě vyvinuta i značná tepelná energie, která má největší podíl na ztrátách spalovacího motoru. Spalovací motor je díky tomu v porovnání s jinými motory (elektromotory, hydromotory, atd.) značně neúčinný. Účinnost spalovacího motoru se pohybuje od 20 % do 30 % (vznětové motory s turbodmychadlem cca 35 %). Od dob svého vzniku si spalovací motory našly uplatnění zejména v dopravě automobilní, železniční, lodní a letecké. Důvod, proč se motory s relativně špatnou účinností přeměny energie těšily a stále těší takové oblibě, je obrovská energie uložená v palivu, které spalovací motory využívají pro svůj provoz. Například výhřevnost benzínu se pohybuje okolo 13 kWh/kg [4], což umožňuje vozidlům se spalovacím motorem značný dojezd při relativně malém množství spáleného paliva. Tuto skutečnost mají však na svědomí chemické reakce procesu vzniku ropy, které trvají miliony let. Příklad uspořádání pohonu se spalovacím motorem je na obrázku 1.



Obrázek 1: Uspořádání pohonu vozidla se spalovacím motorem (pohon jedné nápravy)

1.1.2 Pohon vozidla využívající elektromotor

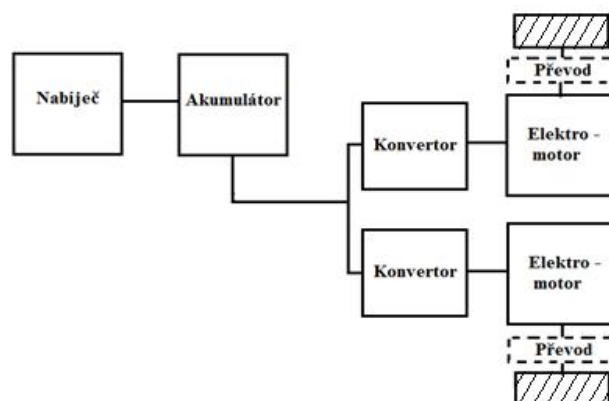
Silniční osobní vozidla poháněná pomocí elektromotorů obecně nazýváme elektromobily. Pohonná jednotka elektromobilu je v podstatě zmenšená varianta elektrického pohonu trolejových dopravních prostředků, jako jsou vlaky, tramvaje, metra nebo trolejbusy. K pohonu těchto trakčních vozidel se prakticky po celé jedno století používalo komutátorových motorů, a to pro jejich výhodnou trakční charakteristiku a vhodné regulační vlastnosti. Společným znakem těchto motorů byl problematický rotační střídač (mechanický

komutátor), který je limitující konstrukční částí tohoto stroje z hlediska proudového zatížení. Teprve rozvoj výkonové polovodičové řídicí a silové techniky umožnil použít pro řízení chodu elektromotorů frekvenční měniče. Frekvenční měniče jsou v současné době nejvyužívanější a nejúčinnější formou řízení trakčních pohonů. S nástupem těchto měničů bylo umožněno plné a téměř bezetrátové řízení rychlosti synchronních a asynchronních motorů. Jako nejvýhodnější pohonná jednotka elektromobilu se jeví synchronní bezkomutátorový motor s permanentními magnety. Toto řešení umožnily nové technologie výroby permanentních magnetů ze slitin vzácných zemin, (zejména neodym - železo - bor a samarium - kobalt). Synchronní motor s permanentními magnety má v porovnání s asynchronním motorem vyšší točivý moment vztažený k objemu stroje (vyšší účinnost), menší oteplení a vyšší momentovou přetížitelnost. Pro účely trakčních pohonů je velmi výhodná dostupnost maximálního točivého momentu již od nulových otáček a snadné reverzování chodu.

Kombinace všech výše zmíněných vlastností umožnila to, že je možné osadit elektromotory přímo do nábojů kol elektromobilu. Zde se nabízí v podstatě dvě možnosti řešení:

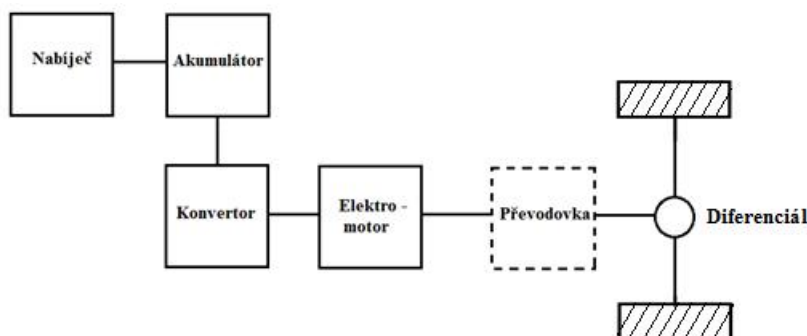
a) zvolit motor s nižším maximálním točivým momentem, který bude výhodný zejména díky své nízké hmotnosti a kompaktnosti, ale nebude nabízet dostatečný točivý moment proto, aby poháněl vozidlo přímo. Bude tedy zapotřebí nainstalovat ještě převod mezi kolo a motor, který však bude mít za následek snížení účinnosti pohonu.

b) zvolit větší a silnější motor, který sice nebude vyžadovat instalaci převodu, ale přispěje k navýšení hmotnosti neodpružených hmot, čímž se zhorší jízdní vlastnosti vozu. Řešení s osazením elektromotorů do nábojů kol je také výhodné z hlediska úspory místa, kdy lze ušetřený prostor využít například jako další zavazadelník. Nevýhodou takového řešení je fakt, že musí být každý motor řízen zvlášť (náhrada diferenciálu), což je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma elektrického pohonu s elektromotory integrovanými v nábojích kol

Na obrázku 3 je znázorněna další možnost uspořádání pohonu s elektromotorem. Tato koncepce využívá jednoho centrálního motoru s následným mechanickým rozvodem točivého momentu mezi dvěma (popřípadě čtyřmi) koly, podobně jako je tomu u klasického pohonu vozidla se spalovacím motorem. Takovéto uspořádání může být opět v provedení s převodovkou nebo bez ní (v závislosti na hodnotách točivého momentu použitého elektromotoru). Tato práce se hlouběji zabývá právě verzí bez převodovky s jedním elektromotorem a mechanickým diferenciálem.



Obrázek 3: Schéma elektrického pohonu využívajícího pro rozvod točivého momentu diferenciál (případně i převodovku)

Mezi nesporné výhody pohonu využívajícího elektromotor patří možnost rekuperace energie. To znamená, že elektromobil využívá při jízdě po spádu, nebo při brzdění generátorického režimu elektromotoru a díky měničové technice je schopen tuto energii vhodným způsobem opět vracet do akumulátorových baterií. Rekuperace tedy nejen prodlužuje celkový dojezd elektromobilu, ale také nedochází k namáhání a opotřebování třecích brzd, tak jako je tomu u klasického automobilu. Při běžném brzdění elektromobilu totiž třecí brzdy nejsou aktivní a prakticky všechna brzdná síla je rekuperována do baterií, až při silném (nouzovém) sešlápnutí brzdového pedálu je aktivován obvod třecích brzd. Tento systém je zvláště výhodný při jízdě ve městě, kde je elektromobil schopný ušetřit až 25 % energie[8].

1.2 Akumulátorové baterie

Akumulátor je zařízení sloužící pro opakované uchování elektrické energie. Většina akumulátorů je založena na chemickém principu. Akumulátor je základní stavební částí elektromobilu, ale zároveň je v současné době nejvíce limitující součástí celého vozidla. Zejména hmotnost, objem a cena akumulátorů představují problém. Od konce minulého století však vývoj akumulátorů zaznamenává rychlý posun (zejména měrná energie), ten je

způsoben mohutným rozmachem mobilních zařízení (mobilní telefony, notebooky, tablety atp.) a v současné době také obrovským nárůstem výkonu těchto zařízení a s tím spojeným nárůstem spotřeby elektrické energie. Ve snaze uspokojit zákaznickou poptávku po dostupném výkonu a miniaturizaci zařízení, investují světové firmy obrovské prostředky do vývoje akumulátorů. Zejména zvyšující se měrná energie, spolehlivost a životnost akumulátorů jsou důvody, proč se v dnešní době začínají stávat elektromobily použitelnějšími a tím pádem i zajímavějšími pro běžného zákazníka.

U elektromobilu jsou použity trakční akumulátory. Tento typ akumulátorů je na rozdíl od běžných startovacích akumulátorů navržen pro opakované hloubkové vybíjení a mnohem méně podléhá opotřebení elektrod při procesu vybíjení a nabíjení. Není sice schopný dodat tak velký krátkodobý výkon jako akumulátor startovací, což při tomto využití příliš nevádí.

V současné době se jako nejvýhodnější jeví akumulátory lithiové, které jsou také nejvyužívanějším typem akumulátorů ve všech mobilních aplikacích. Jejich výhodou je vynikající měrná energie, která může dosahovat až 160 Wh/kg (trakční akumulátory spíše 100 Wh/kg), což je oproti akumulátorům olověným (měrná energie 25 Wh/kg), které byly používány prakticky celé minulé století, opravdu velký pokrok [8]. Akumulátor však podléhá opotřebení a to zejména při procesu vybíjení a nabíjení, životnost akumulátoru se tedy uvádí v počtu nabíjecích cyklů, kdy výrobci dnešních trakčních akumulátorů udávají až 4000 cyklů. Tato životnost ovšem neznamená, že by po jejím uplynutí byl akumulátor zcela zničen, pouze poklesne jeho kapacita na 80 %. Při návrhu akumulátoru pro elektromobil zohledňujeme ještě rezervu 10 %, aby nedocházelo k hloubkovému vybíjení akumulátoru. Jako disponibilní energii uloženou v akumulátoru tedy uvádíme pouze 70 % skutečně obsažené energie.

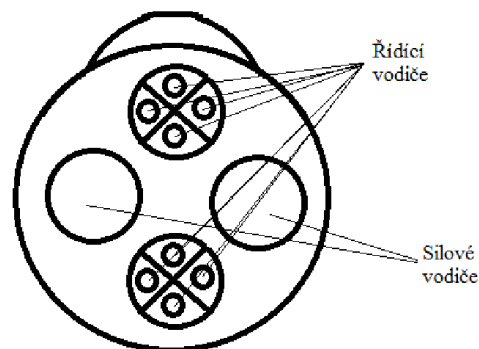
Pro zajímavost je uvedeno srovnání uložené energie v bateriích a v benzínu. Pokud by tedy byl uvažován jeden kilogram nového trakčního lithiového akumulátoru a jeho energii 100 Wh je zřejmé, že oproti 1 litru benzínu, který obsahuje cca 11 kWh tepelné energie, ze které lze získat ve spalovacím motoru 3,5 kWh mechanické práce, je měrná energie akumulátoru opravdu znatelně horší. Tuto skutečnost však částečně vyvažuje fakt, že nejlepší dnešní elektromotory jsou schopny pracovat s účinností přesahující 95 %, zatímco moderní přeplňované spalovací motory pouze s 35 %. Výhledy do budoucna navíc ukazují na fakt, že výroba elektrické energie bude směřovat spíše k obnovitelným zdrojům, ze kterých je možno získávat elektrickou energii přímo, zatímco energie uložená v omezených zásobách ropných produktů se v nich shromažďovala miliony let.

1.2.1 Požadavky na dobíjení elektromobilu

Snad největším problémem provozu elektromobilů je doba nabíjení akumulátorových baterií. Pro běžného uživatele klasického vozidla se spalovacím motorem je nepředstavitelné, že by na cestě zastavil na čerpací stanici, kde by musel čekat několik hodin na nabití baterií ve svém elektromobilu. Tento problém si výrobci elektromobilů plně uvědomují, a proto v dnešní době nezůstává dobíjení elektromobilů zdaleka u dobíjení z klasické domovní zásuvky 230 V 16A. Pro běžného uživatele, který ve své domácnosti nemá žádné speciální vybavení pro nabíjení elektromobilu, a přesto by chtěl svůj elektromobil nabíjet, to v praxi znamená, že tento úkon bude trvat dlouhé hodiny.

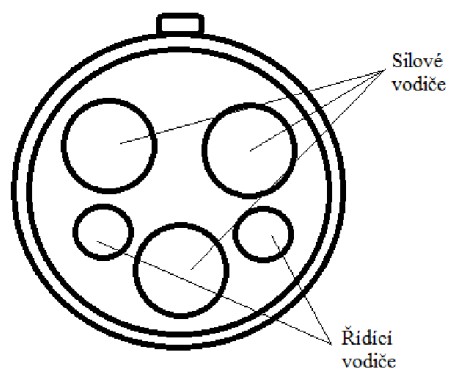
V praxi se používají samozřejmě i jiné (dokonalejší) systémy nabíjení. Tyto systémy využívají jak střídavého, tak i stejnosměrného proudu. Připojovací kabely obsahují kromě silových i řídicí vodiče, které zabezpečují ideální nabíjecí postup, podle požadavků majitele elektromobilu, ale i podle potřeb poskytovatele elektrické energie.

Sdružení japonských automobilek (Toyota, Nissan, Honda, Subaru a Mitsubishi) používají v řadě elektromobilů svůj standard, a sice nabíjecí systém CHAdeMO (obrázek 4), který využívá nabíjení pomocí stejnosměrného proudu o hodnotě 125A a napětí 500V.



Obrázek 4: Pohled z čela konektoru nabíjecího systému CHAdeMO

Dalším nabíjecím systémem, využívaným především americkými automobilkami (Tesla, GM, Chrysler a Ford), je systém SAE J1772 (obrázek 5). Tento systém pracuje se stejnosměrným proudem až 200A při napětí 450V.



Obrázek 5: Pohled z čela konektoru nabíjecího systému SAE J1772

Srovnání různých dobíjecích systémů je naznačeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání různých způsobů dobíjení elektromobilů

-	Proud	Napětí	Příkon	Nabíjecí výkon
-	A	V	kW	kW
Domovní zásuvka	16	230	3,7	3
Domovní zásuvka	32	400	12,8	10,4
CHAdeMO	125	500	62,5	50,6
SAE J1772	200	450	90	72,9

1.3 Cíle elektromobility

První snahy o výrobu vozidla poháněného elektromotorem sahají až daleko před vývoj prvních funkčních automobilů se spalovacím motorem. Jako vůbec první vozidlo poháněné elektrickým motorem je označováno vozítko sestavené holandským profesorem Sidrandusem Stratinghem a jeho asistentem Christopherem Beckerem už v roce 1835[14], což je 50 let před uvedením do provozu prvního automobilu. Zajímavostí také je, že v USA v roce 1900 bylo vyrobeno více vozidel poháněných elektromotorem, než spalovacím motorem.

Avšak snaha vyvinout moderní, funkční a použitelný elektromobil byla vždy spojena se snahou vyvinout alternativu k automobilům poháněným spalovacími motory. S dlouhodobě narůstajícími cenami ropných produktů bylo hlavním cílem zlevnění provozu automobilů.

Dalším problémem je skutečnost, že největší zásoby ropy leží na územích států s nestabilním politickým zřízením, což pro západní země představuje nejistotu a nedůvěru ve spolehlivé zásobování a stabilitu ceny ropy. Rozšíření vozidel poháněných elektrickou energií by proto znamenal určitou nezávislost na dodávkách ropy a do jisté míry i menší ekonomickou náročnost dopravy.

Snad největším problémem automobilů poháněných spalovacími motory je nepříznivý dopad na životní prostředí. Zhruba od poloviny 20. století se společnost začala ve velké míře zabývat otázkou ochrany životního prostředí a snižováním jejího poškozování. S obrovským nárůstem osobní automobilové dopravy se staly spalovací motory největšími podílníky na znečišťování ovzduší. Logickou souvislost má samozřejmě hustota provozu automobilů s hustotou zalidnění. To v praxi znamená, že hlavně v centrech velkých měst (kde navíc bývá zastaralá a nevyhovující dopravní infrastruktura) je znečištění ovzduší největší a dopad na zdraví obyvatel kritický. Kromě znečišťování ovzduší výfukovými plyny škodí vozidla se spalovacími motory zdraví také produkcí nadměrného hluku. V poslední době se prokazuje, že nadměrný hluk má u člověka dopad nejen na psychickou stránku (znesnadnění komunikace, znesnadnění soustředění atd.), ale svými dalšími negativními účinky (nadměrné namáhání sluchu a celkové přetěžování CNS) nepřímo způsobuje vážné zdravotní problémy s krevním oběhem, trávicí soustavou atd. V současné době na tuto problematiku reagují velká evropská města úplným zákazem nebo alespoň omezením vjezdu osobních vozidel do nejvíce znečišťovaných nebo nejvíce obydlených zón. Tato omezení vypadají v praxi tak, že zastaralé automobily s vyššími emisemi škodlivých látek mohou vjíždět do takových zón pouze za poplatek, který bývá často značný. Taková a jim podobná omezení budou v budoucnu přibývat velice rychle. Tato omezení se samozřejmě nevztahují na elektromobily, protože ty mají lokální emise výfukových plynů nulovou. Právě provoz ve velkých městech, který je pro spalovací pohony nevhodný (časté stání a zbytečný běh motoru na volnoběh, který výrazně zvyšuje spotřebu a tedy i znečištění a hluk), je pro provoz elektromobilů nejvhodnější. Elektromobil, na rozdíl od automobilu se spalovacím motorem, při stání v koloně nebo na křižovatce má motor zcela zastavený a tím pádem nespotřebovává žádnou energii. Členitý městský provoz, kde je potřeba často brzdit, je navíc ideální pro rekuperaci energie, kdy je elektromobil schopný vrátit zpět do baterií až 25% energie na rozdíl od vozidla se spalovacím motorem, které přebytečnou energii při brzdění promění v teplo třecími brzdami, přičemž dochází k jejich opotřebení a šíření škodlivého prachu z brzdového obložení. Je logické, že místní znečištění ovzduší způsobené jízdou elektromobilu je nulové, což je jednou z jeho hlavních předností, znečištění ovzduší z globálního hlediska se však odvíjí zejména ze způsobu výroby elektrické energie. Současný stav výroby elektrické energie v ČR můžeme vidět například v tabulce 41. V budoucnu se ale počítá s postupným odstavováním uhelných elektráren a jejich nahrazování elektrárnami "čistými", jako jsou jaderné, solární, vodní, větrné atd. Uhlíková stopa vyrobené elektrické

energie použité pro provoz elektromobilu je v současné době v České republice téměř srovnatelná s uhlíkovou stopou provozu moderního automobilu, jak ale dokládá tabulka 45, tato situace se v průběhu několika dalších desetiletí bude výrazně měnit. Podle odhadu by měla s vývojem elektráren v ČR klesnout produkce uhlíku do roku 2040 téměř na třetinu té současné[11].

Akční rádius automobilů provozovaných ve městech a jejich okolí v ČR je v průměru 80 km [5], což je moderní elektromobil schopen bezpečně pokrýt. Jeho dojezd v dnešní době bývá okolo 100 - 200 km na jedno nabití (elektromobil Model S od firmy Tesla se dokonce pyšní dojezdem až 500km). Naprostá většina osobních automobilů provozovaných na krátké a střední vzdálenosti jsou poháněny zážehovým spalovacím motorem, a proto se tato práce zabývá právě srovnáním pohonu elektrického a pohonu se spalovacím zážehovým motorem.

2 VÝPOČTOVÝ MODEL VOZIDLA SE SPALOVACÍM MOTOREM

2.1 Volba vozidla

Jako vozidlo se zážehovým spalovacím motorem bylo pro tuto práci zvoleno takové, které denně používám a ke kterému je snadno dostupná technická dokumentace a také parametry, které se v běžné dokumentaci neuvádí (například hodnota aerodynamického součinitele, průběh měrné spotřeby, atd.). Skutečnost, že mohu všechny výpočty přímo ověřit, nebo dokonce hned při výpočtu přibližně zhodnotit, jestli je výsledek správný, mi při tvorbě této práce velmi pomohlo. Jedná se o vozidlo, které je v dnešní době již značně zastaralé, ale pro účely porovnání pohonu se spalovacím motorem a elektromotorem bude postačující.

2.2 Základní parametry vozidla

Jedná se o vozidlo Škoda Felicia v karosářském provedení hatchback s motorem o objemu 1,3 litru. Maximální výkon tohoto motoru je 50 kW při 5000 ot/min a maximální točivý moment je 106 Nm při 2600 ot/min. Vozidlo není vybaveno žádnou nadstandardní výbavou a také proto je jeho hmotnost velice nízká. Prázdné vozidlo váží pouhých 935 kg a plně obsazeného potom 1410 kg. Pro výpočty v této práci je uvažováno zatížení vozidla pouze jedním pasažérem o hmotnosti 90 kg. Další parametry potřebné pro výpočty v této práci jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Parametry uvažovaného vozidla se spalovacím motorem

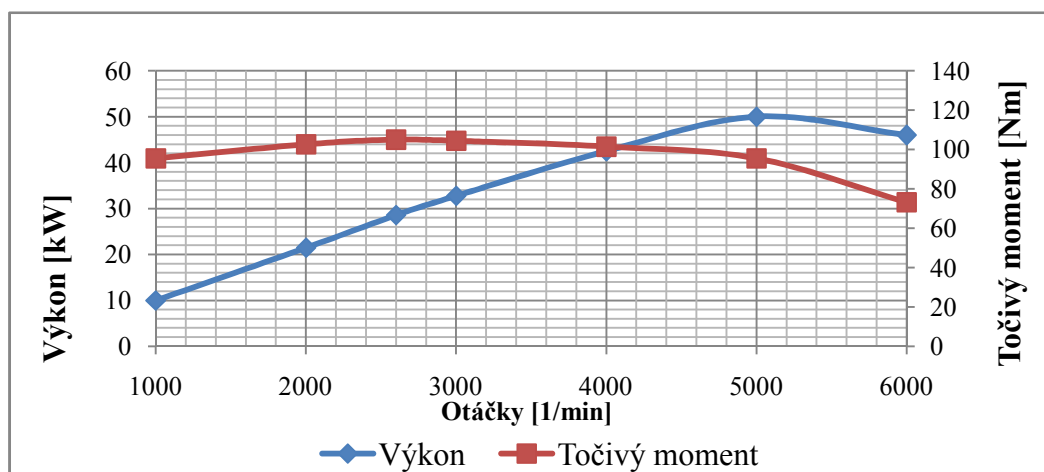
Technické parametry		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Vozidlo		
Typ	-	Osobní automobil
Značka	-	Škoda
Obchodní označení	-	Felicia
Karoserie	-	Hatchback
Počet míst	-	5
Motor		
Druh	-	zážehový
Počet válců	-	4
Uspořádání	-	napříč
Objem	cm ³	1 289
Max. točivý moment	Nm	106
Při otáčkách	ot/min	2 600
Max. výkon	kW	50

Při otáčkách	ot/min	5 000
Rozvod	-	OHV
Palivo	-	natural 95
Pohon		
Trakční náprava	-	přední
Šířka pneumatik	mm	165
Profil pneumatik	%	70
Průměr disků	in	13
Průměr kol nových	mm	561,2
Maximální rychlost	km/h	162
Ostatní parametry		
Účinnost převodovky	%	96
Účinnost rozvodovky	%	96
Měrný odpor valení	N/kN	15
Čelní plocha	m ²	1,9
Součinitel tvaru	-	0,35
Hustota vzduchu	kg/m	1,2

Zdroj [13]

2.3 Charakteristiky spalovacího motoru

Prostředek, kterým lze nejlépe popsat průběh a chování spalovacího motoru je jeho výkonová a momentová charakteristika. Jak je vidět z grafu 1, tak charakteristika motoru není ani z daleka ideální pro pohon automobilu.



Graf 1: Momentová charakteristika spalovacího motoru [9]

Pokud by byla snaha takový motor připojit přímo na hnací nápravu, tak by se vyskytlo hned několik problémů. Prvním by nejspíš byl ten, že spalovací motor, na rozdíl od elektrického, musí stále běžet alespoň na minimální volnoběžné otáčky, aby zůstal

k dispozici pro rozjezd vozu. Dalším problémem by bylo to, že v nízkých otáčkách má spalovací motor příliš nízký točivý moment v poměru ke svému momentu maximálnímu. Maximální moment zážehového spalovacího motoru je k dispozici až v poměrně vysokých otáčkách, což by způsobilo jeho značnou nehospodárnost. Aby bylo možné tyto problémy odstranit, musí být automobil vybaven převodovkou a spojkou. Spojka umožňuje odpojit točivý moment motoru od převodovky a tím zabezpečit hladké řazení jednotlivých převodových stupňů. Uvažované vozidlo je vybaveno pětistupňovou převodovkou. Tabulka 3 udává hodnoty převodových poměrů pro jednotlivé převodové stupně vozidla. Tyto hodnoty však nejsou celkovými převodovými poměry mezi hřídelí motoru a koly. Výpočet celkového převodového poměru je znázorněn ve vztahu 1.

$$i_{celk} = i_p \cdot i_s \quad (1)$$

kde: i_{celk} celkový převod automobilu [-]
 i_p převod převodového stupně [-]
 i_s stálý převod [-]

Tabulka 3: Technické parametry převodovky

Technické parametry převodovky		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Počet převodových stupňů	-	5
Převod 1. stupně	-	3,46
Převod 2. stupně	-	1,96
Převod 3. stupně	-	1,31
Převod 4. stupně	-	0,98
Převod 5. stupně	-	0,76
Stálý převod	-	4,12
Součinitel rotačních hmot pro 1. stupeň	-	1,45
Součinitel rotačních hmot pro 2. stupeň	-	1,14
Součinitel rotačních hmot pro 3. stupeň	-	1,07
Součinitel rotačních hmot pro 4. stupeň	-	1,05
Součinitel rotačních hmot pro 5. stupeň	-	1,04
Součinitel rotačních hmot pro Neutrál	-	1,02

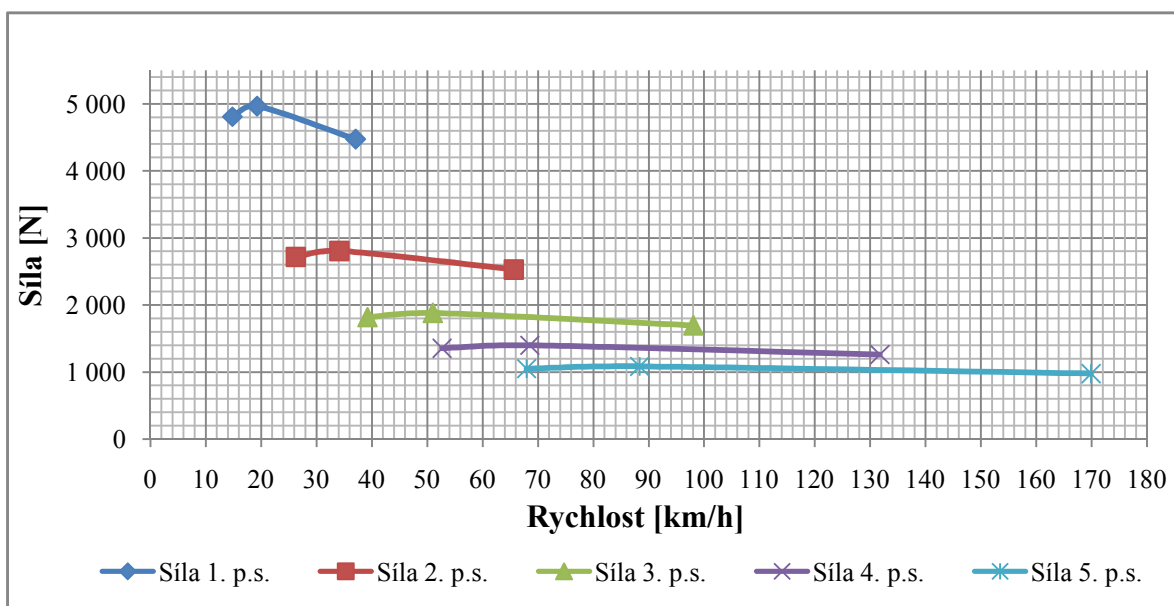
Zdroj [9]

Pomocí vztahu 2 je možné jednotlivé momenty přepočítat na sílu působící na obvodu hnacích kol.

$$F = \frac{M_m \cdot i_{\text{celk}} \cdot \eta}{r_k} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

kde: M_m moment motoru [Nm]
 η účinnost přenosu výkonu
 r_k poloměr kola [m]

Tato síla závisí na momentu motoru v daném okamžiku, ale především na celkovém převodovém poměru pro zařazený rychlostní stupeň. Soubor průběhů těchto sil se nazývá trakční charakteristika, která znázorňuje průběh síly, kterou působí hnací náprava na vozovku při jízdě vozidla. Průběhy sil na obvodu kol jsou znázorněny v grafu 2.



Graf 2: Trakční charakteristika automobilu

2.4 Jízdní odpory

2.4.1 Aerodynamický odpor

Pohybující se vozidlo vyvolává okolo sebe proudění vzduchu. Jako důsledek tohoto proudění vzniká na čele vozidla a pod podvozkem přetlak, za zádí vozidla naopak podtlak. Dále dochází mezi povrchem karoserie a prostředím ke tření, které opět přispívá ke zvyšování jízdního odporu. Se záměrem snížit vzdušný odpor vozidla se na vozidlech provádí celá řada konstrukčních úprav, např. zaoblení hran karoserie, spoilery, kryty motoru, speciální tvary čelních světlometů atd.. Takovéto úpravy mají za následek snížení víření vzduchu okolo vozidla a tím i snížení celkového aerodynamického odporu.

Aerodynamický odpor vozidla lze vyjádřit následujícím vztahem (vztah 3):

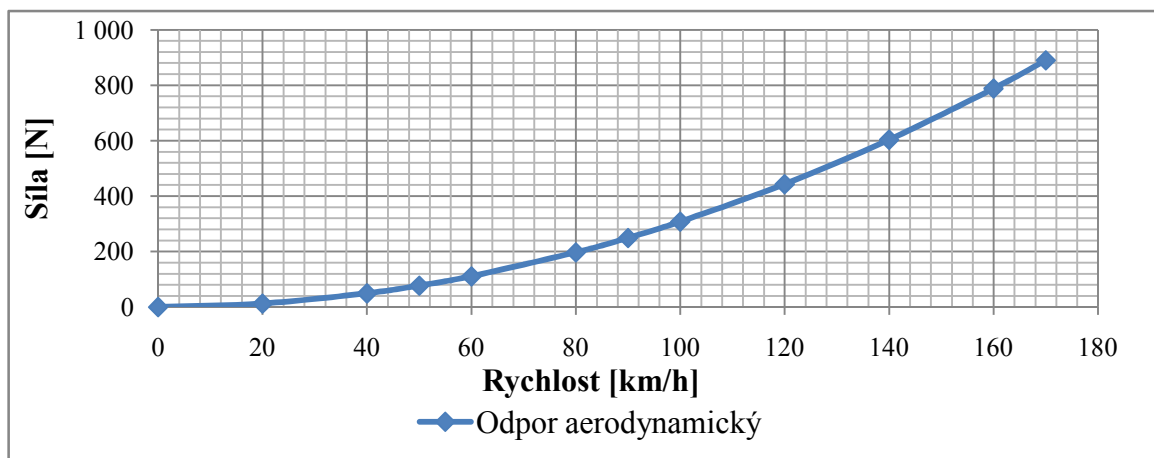
$$O_a = F_a = c_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (3)$$

kde: c_x součinitel tvaru vozidla [-]
 S_x plocha příčného řezu vozidla [m^2]
 ρ hustota prostředí [kg/m^3]
 v rychlost [m/s]

Pro uvažované konkrétní vozidlo budou tedy do vzorce 3 dosazovány hodnoty z tabulky 2. Pro výpočet je předpokládána nulová rychlost větru. Průběh závislosti aerodynamického odporu uvažovaného vozidla na rychlosti popisuje tabulka 4 a graf 3.

Tabulka 4: Hodnoty aerodynamického odporu

v	km/h	0	20	40	50	60	80	90	100	120	140	160
F_a	N	0	12	49	77	111	197	249	308	443	603	788



Graf 3: Průběh aerodynamického odporu

Ze vztahu a z výsledků vyplývá, že nejpodstatnějších změn dosahuje aerodynamický odpor zejména ve vysokých rychlostech, protože narůstá s její druhou mocninou. Zde se mluví o tzv. relativní rychlosti vozidla, protože se nejedná o rychlost, kterou se vozidlo reálně pohybuje po vozovce, ale o rozdíl rychlostí vozidla a okolního vzduchu. Dalším parametrem ovlivňujícím vzdušný odpor je hustota prostředí, kdy v závislosti na teplotě a nadmořské výšce může dojít v extrémním případě ke změně hustoty vzduchu až o 30%. Zbylé dva parametry (součinitel tvaru a plocha příčného řezu) jsou dány konstrukcí vozidla. V současné době přísného snižování emisních limitů a s tím spojeným snižováním spotřeby paliva, je při výrobě nových vozů kladen velký důraz zejména na snížení hodnoty součinitele tvaru vozidla. V praxi se v podstatě jedná o hledání kompromisu mezi ideálním aerodynamickým tvarem, designem, bezpečností a praktickou využitelností vnitřního prostoru vozidla.

Pro názornost je uvedena tabulka 5 přibližných hodnot součinitele tvaru některých typů vozidel:

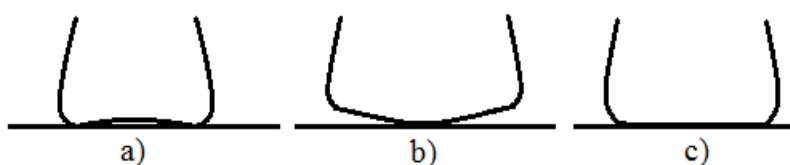
Tabulka 5: Vybrané typy vozidel a jim odpovídající hodnoty součinitele tvaru vozidla

Typ vozidla	Rozsah součinitele tvaru vozidla
Motocykl	0,6 ÷ 1,2
Osobní automobil	0,25 ÷ 0,4
Dodávkový automobil	0,4 ÷ 0,5
Nákladní automobil	0,6 ÷ 1,3
Autobus	0,5 ÷ 0,7

Zdroj[1]

2.4.2 Valivý odpor

V procesu přenosu točivého momentu motoru vozidla na vozovku hrají důležitou roli pneumatiky. Jejich parametry mají přímý dopad na jízdní vlastnosti vozidla. Aby byla zajištěna dostatečná přilnavost pneumatiky k vozovce, je důležité zejména správné huštění pneumatik. Na obrázku 6 je zobrazeno, že příliš, nebo naopak málo, nahuštěná pneumatika nepůsobí na vozovku ideální plochou, což má za následek zhoršení jízdních vlastností (prodloužení brzdné dráhy, zhoršené chování v zatáčce atd.).



Obrázek 6: Huštění pneumatik: a) podhuštěná, b) přehuštěná, c) správné huštění

I při dodržení správného huštění pneumatik však dochází při styku kola s vozovkou k jejich deformaci. Jako důsledek těchto deformací vzniká tzv. měrný odpor valení. Měrný odpor valení udává, jakou silou působí odpor styku kola s vozovkou proti směru jízdy v závislosti na zatížení vozidla, jednotka ve které je udáván je [N/kN]. Jak už bylo zmíněno, měrný odpor valení závisí zejména na správném huštění pneumatik, při nedostatečně nahuštěné pneumatice odpor valení stoupá, naopak při přehuštěné pneumatice odpor valení klesá, ale bohužel na úkor jízdních vlastností. Dalším parametrem, který ovlivňuje měrný odpor valení je povrch vozovky. Přibližné hodnoty měrného odporu valení pro jednotlivé povrchy jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Seznam vybraných povrchů a jim odpovídající měrné odpory valení

Povrch	Měrný odpor valení	Povrch	Měrný odpor valení
Asfalt	10 ÷ 15	Travnatý terén	80 ÷ 250
Beton	15 ÷ 20	Hluboký písek	150 ÷ 300
Dlažba	20 ÷ 30	Sníh	200 ÷ 300
Polní cesta	40 ÷ 200	Náledí	10 ÷ 25

Zdroj [1]

Jestliže je měrný odpor valení známý, lze spočítat celkový jízdní odpor způsobený stykem kola s vozovkou. Tento jízdní odpor se nazývá valivý odpor, vypočítat jej lze pomocí vztahu 4.

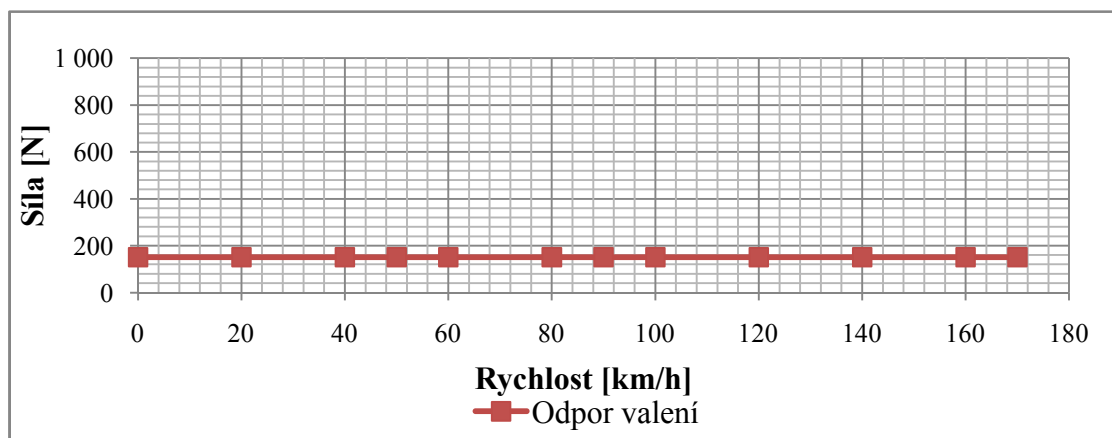
$$O_v = F_v = m \cdot g \cdot f \text{ [N]} \quad (4)$$

kde: m hmotnost vozidla [t]
g tíhové zrychlení [m/s^2]
f měrný odpor valení [N/kN]

Pro tuto práci je počítáno s nejhorší hodnotou pro asfaltový povrch z tabulky 5. Pro zjednodušení není uvažováno zvětšení valivého odporu při vysokých rychlostech. Pro účely porovnání je využito pouze hodnot do 90 km/h, kde je i tak zvětšení valivého odporu při vysoké rychlosti možné zanedbat bez většího vlivu na výsledek. Průběh valivého odporu je znázorněn v tabulce 7 a grafu 4

Tabulka 7: Hodnoty valivého odporu

v	km/h	0	20	40	50	60	80	90	100	120	140	160
F_v	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152



Graf 4: Valivý odpor

2.4.3 Odpor setrvačnosti

Při zrychlování vozidla působí proti směru jeho pohybu odporová síla, která je nazývána odpor setrvačnosti. Tento jízdní odpor je složen z odporu zrychlení posuvné části a odporu zrychlení rotačních částí. Platí pro něho vztah 5:

$$O_z = F_z = m \cdot a \cdot \vartheta \quad [\text{N}] \quad (5)$$

kde: m hmotnost vozidla [kg]
 a zrychlení vozidla [m/s^2]
 ϑ součinitel rotačních částí vozidla [-]

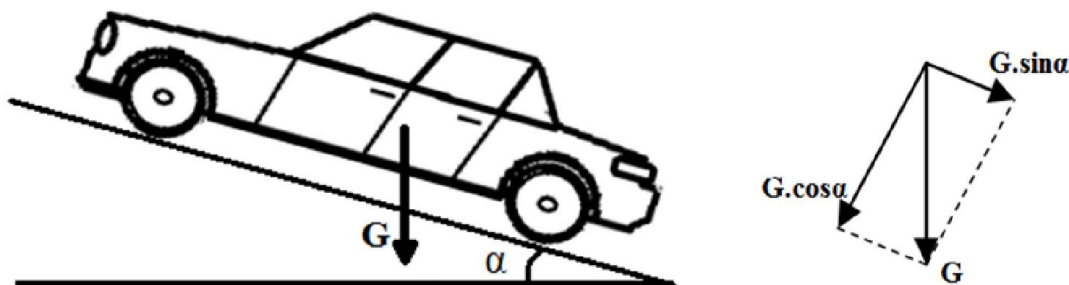
Více o výpočtu tohoto odporu je zmíněno v kapitole 2.5.

2.4.4 Odpor stoupání

Při pohybu vozidla do kopce působí proti směru jeho pohybu složka tíhové síly rovnoběžná s vozovkou (obrázek 2). Tato síla v podstatě reprezentuje další jízdní odpor jedoucího vozidla, a sice odpor stoupání. V případě, že se vozidlo pohybuje opačným směrem, tedy z kopce dolů, tak se o tuto složku tíhové síly zvětšuje celková síla působící ve směru pohybu vozidla. Tyto dva případy reprezentuje znaménko + respektive - ve vztahu 6.

$$O_s = F_s = \pm m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad [N] \quad (6)$$

kde: m hmotnost vozidla [kg]
 g gravitační zrychlení [m/s^2]
 α sklon vozovky [$^\circ$]



Obrázek 7: Vozidlo jedoucí do/z kopce a složení tíhové síly tohoto vozidla

Pro zjednodušení výpočtů je v této práci uvažována jízda vozidla po rovině a tedy odpor stoupání nulový.

2.4.5 Celkový odpor působící na vozidlo

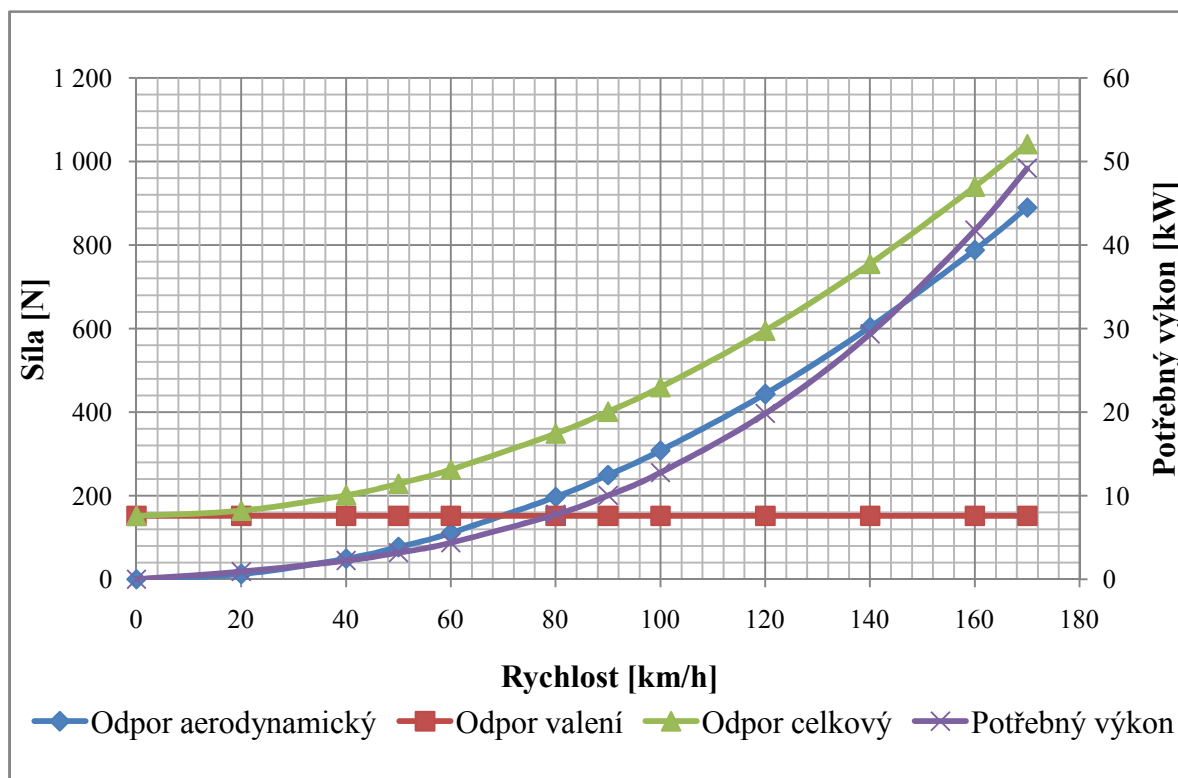
Celkový odpor lze spočítat jako součet všech dílčích odporů působících na jedoucí vozidlo. V tabulce 8 a v grafu 5 je vidět průběh celkového odporu a jeho složek. Odporová síla je zde přepočítána také na výkon pro snazší demonstraci velikosti jízdních odporů. Tento výpočet je proveden podle vztahu 7.

$$P = F \cdot v \quad (7)$$

kde: F síla [N]
 v rychlost [m/s]
 P výkon [W]

Tabulka 8: Hodnoty odporů působících proti jízdě vozidla

v	km/h	0	20	40	50	60	80	90	100	120	140	160
F_a	N	0	12	49	77	111	197	249	308	443	603	788
F_v	N	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152
F_{celk}	N	152	164	201	229	262	349	401	459	595	755	940
P	kW	0	1	2	3	4	8	10	13	20	29	42



Graf 5: Zobrazení závislosti jízdních odporů na rychlosti

2.5 Zrychlení vozidla

Z pohybové rovnice vozidla (vztah 8) je zřejmé, že tuto rovnici doplňuje odpor setrvačných sil.

$$F_t = F_a + F_v + F_s + F_z \quad [N] \quad (8)$$

kde: F_t celková tažná síla vozidla
 F_a odpor aerodynamický
 F_v odpor valivý
 F_s odpor stoupání
 F_z odpor zrychlení

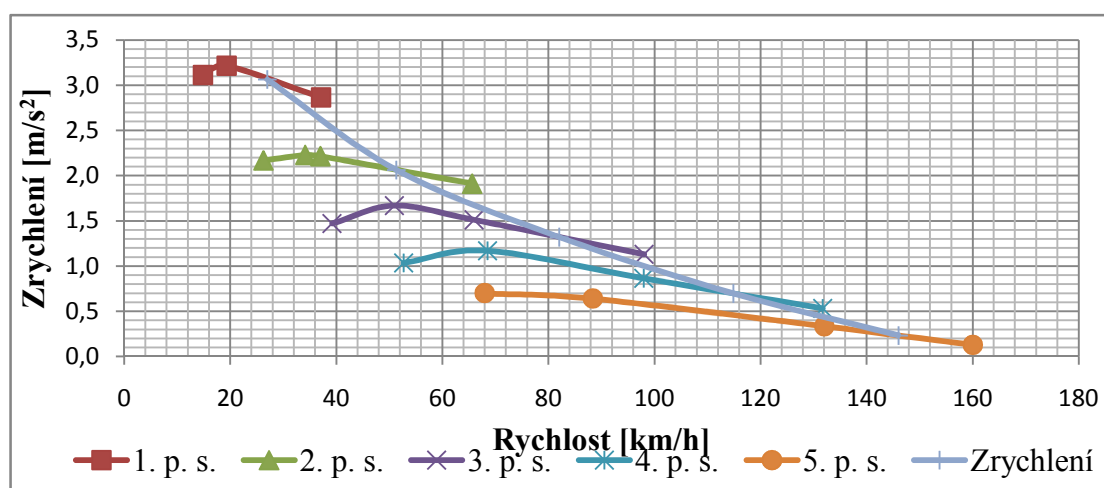
Jak vyplývá ze vztahu 5, tak odpor setrvačných sil závisí na zrychlení vozidla, hmotnosti vozidla a na celkovém součiniteli rotačních hmot. To znamená, že pro každý okamžik a pro každý zařazený rychlostní stupeň bude tento odpor jiný.

Podle vztahu 5 je sestavena tabulka hodnot zrychlení pro jednotlivé zařazené rychlostní stupně a pro určité hodnoty rychlosti vozidla. Jako příklad jsou v tabulce 9 uvedeny hodnoty pro 1. a 2. převodový stupeň. Tyto hodnoty platí pouze při jízdě po rovině a za ideálních povětrnostních podmínek.

Tabulka 9: Tabulka vypočtených hodnot zrychlení pro 1. a 2. převodový stupeň

Zrychlení vozidla				
v	F _{odpor}	F _{trakční}	F _{zrychlení}	a
km/h	N	N	N	m/s ²
1. převodový stupeň				
15	158	4 807	4 649	3,1
19	163	4 963	4 800	3,2
37	194	4 472	4 278	2,9
2. převodový stupeň				
26	173	2 717	2 545	2,2
34	187	2 806	2 618	2,2
37	194	2 795	2 601	2,2
66	284	2 528	2 244	1,9

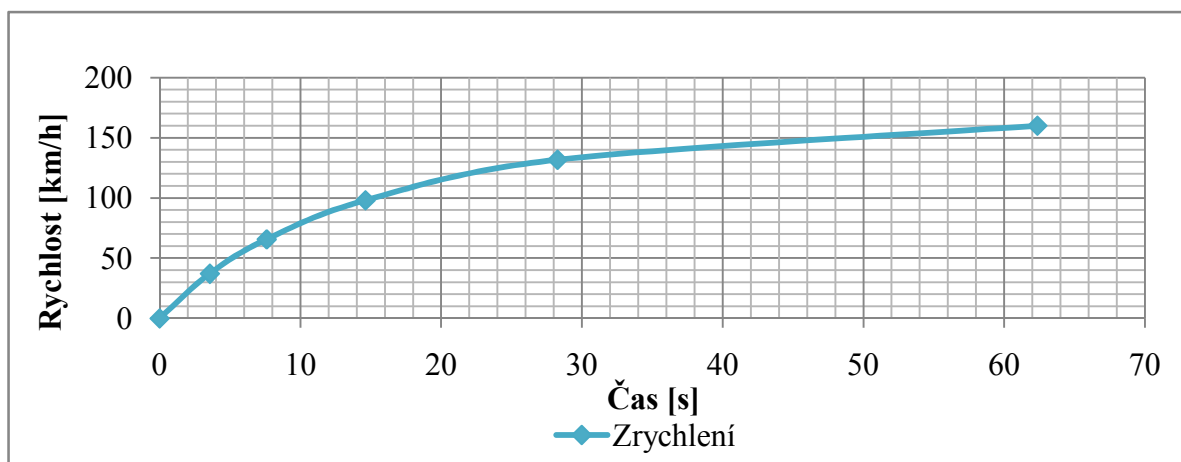
Po určení hodnot pro všechny zařazené rychlostní stupně, lze sestavit graf 6, který ukazuje průběhy zrychlení. Je zde proložena i křivka demonstrující průměrné zrychlení, kterého je vozidlo ještě schopné a jak by zrychlení vypadalo, kdyby neprobíhalo řazení rychlostních stupňů skokově, ale plynule.



Graf 6: Průběhy zrychlení vozidla

Pro lepší demonstraci zrychlení vozidla je vhodné uvést také graf 7, který znázorňuje zrychlení v podobě závislosti rychlosti vozidla na čase. Konstrukce grafu vychází z hodnot vypočtených podle vztahu 9.

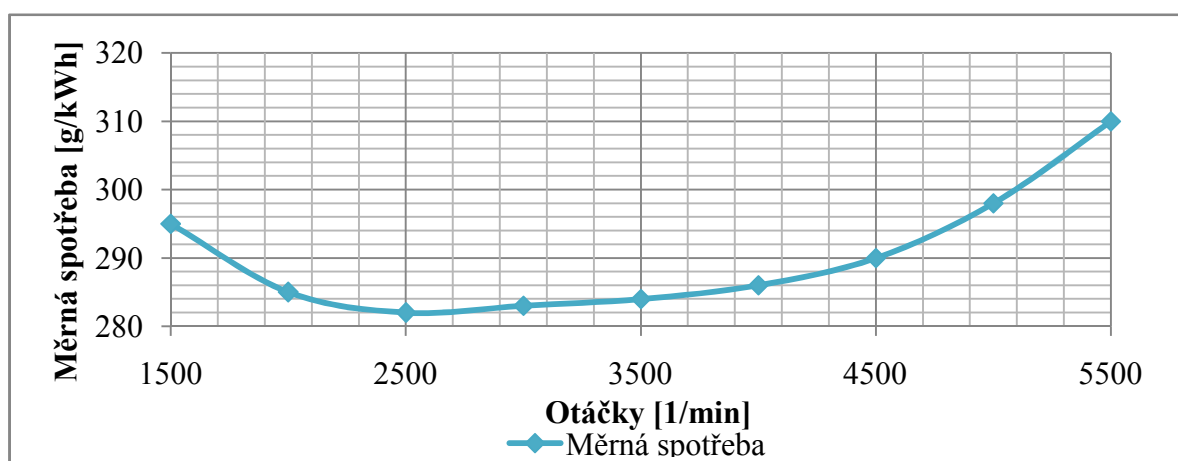
$$a = \frac{dv}{dt} \text{ [m/s}^2\text{; m/s, s]} \quad (9)$$



Graf 7: Zrychlení vozidla

2.6 Výpočet energetické náročnosti vozidla se spalovacím motorem

Pro výpočet energetické náročnosti provozu vozidla se spalovacím motorem je třeba znát průběh měrné spotřeby. Měrná spotřeba udává jaké množství paliva je spotřebovááno ve spalovacím motoru při určitých otáčkách. Průběh měrné spotřeby pro uvažovaný vůz je zobrazen v grafu 8.



Graf 8: Měrná spotřeba spalovacího motoru [9]

Pro zjednodušení výpočtu je stanoveno několik ustálených rychlostí, pro které bude určena spotřeba trakční práce. Pro tyto rychlosti jsou v tabulce 10 uvedeny i odpovídající

otáčky motoru zjištěné z grafu 2 a přepočtené pomocí vztahu 10 a také hodnoty měrné spotřeby odečtené z grafu 8.

Tabulka 10: Měrná spotřeba odpovídající zvoleným jízdním režimům

Rychlostní stupeň	Rychlost	Otáčky	Měrná spotřeba	Účinnost motoru
-	km/h	ot/min	g/kWh	%
4.	50	2 000	285	27,2
5.	80	2 300	283	27,4
5.	90	2 600	282	27,5
5.	120	3 500	284	27,3

Dále je třeba vypočítat hodnotu trakční práce, kterou vozidlo potřebuje pro jednotlivé jízdní režimy a pro překonání dráhy 100 km. Trakční práce vykonaná vozidlem při jízdě ustálenou rychlostí po rovině a za bezvětří závisí na velikosti vypočtených jízdních odporů a samozřejmě na ujeté vzdálenosti, jak udává vztah 10.

$$A = O_{\text{celkový}} \cdot s \quad (10)$$

kde: A trakční práce [J]

$O_{\text{celkový}}$ součet všech odporů působících na jedoucí vozidlo [N]

s dráha [m]

Výsledky výpočtů trakční práce jsou uvedeny v tabulce 11. Tyto hodnoty jsou tedy přepočteny z hodnot jízdních odporů pro jednotlivé rychlosti a pro ujetou dráhu 100km.

Tabulka 11: Trakční práce vykonaná na dráze 100 km

Rychlost	km/h	50	80	90	120
Trakční práce na 100 km	kWh/100km	6,3	9,7	11,1	16,5

Pro lepší představu o spotřebě vozidla se spalovacím motorem je dobré vyjádřit celkovou spotřebu vozidla v objemu spáleného paliva na 100 km jízdy. K tomuto výpočtu je potřeba znát výhřevnost paliva. Výhřevnost pro benzín Natural 95 je uvedena v tabulce 12.

Tabulka 12: Parametry benzínu Natural 95

-	Hustota	Výhřevnost	Výhřevnost	Výhřevnost	Výhřevnost
	Kg/l	MJ/kg	kWh/kg	MJ/l	kWh/l
Natural 95	0,76	46,4	12,9	35,3	9,8

Zdroj [3]

Z údajů uvedených a vypočtených výše je nyní možné vypočítat také účinnost motoru, která je daná poměrem energie potřebné pro jízdu vozidla a energie, která je skutečně obsažena v dodaném palivu. Nejprve je potřeba zde započítat účinnost přenosu točivého momentu, která je pro tento případ 92% a zohledňuje ztráty na přenosu momentu převodovkou a diferenciálem, z čehož je získána hodnota energie dodané motorem. Dále je pomocí hodnoty výhřevnosti benzínu vypočtena skutečná energie obsažená v dodaném palivu. Výsledky těchto výpočtů jsou uvedeny v tabulce 13. Pro dva zvolené jízdní režimy (konstantní rychlost 90 a 120 km/h) udává výrobce skutečnou spotřebu paliva, která je v tabulce taktéž uvedena.

Tabulka 13: Spotřeba paliva

Rychlost	Trakční práce	Energie dodaná motorem	Měrná spotřeba	Energie obsažená v palivu	Účinnost motoru	Spotřeba vypočtená	Spotřeba udávaná výrobcem
km/h	kWh/100km	kWh	g/kWh	kWh/100km	%	l/100km	l/100km
50	6,3	6,9	285	25	27,2	2,6	-
80	9,7	10,5	283	38	27,4	3,9	-
90	11,1	12,1	282	44	27,5	4,5	5
120	16,5	17,9	284	66	27,3	6,7	7,2

Při porovnání spotřeby paliva udávané výrobcem a spotřeby vypočtené lze vidět odchylku cca 0,5 l/100km, tato odchylka je způsobena tím, že výpočet je prováděn pro vozidlo zatížené pouze jedním pasažérem a také proto, že podmínky při měření spotřeby výrobcem jsou laboratorní a snaží se při něm o simulaci takového zatížení vozidla, které se bude nejlépe blížit reálné spotřebě v podmínkách, které rozhodně nejsou ideální.

2.7 Validace hodnot

Validace spočívá v porovnání skutečných (změřených) a předpokládaných (vypočtených) hodnot. V rámci řešení bakalářské práce byla validace zaměřena na kontrolu parametru valivý odpor. Měření byla prováděna na různé povrchy vozovky a pro různá zatížení automobilu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Validace valivého odporu

	Zátěž	Celková hmotnost	Odpor nejnižší	Odpor nejvyšší	Odpor průměrný
	kg	kg	N	N	N
Asfalt	0	935	140	160	150
	100	1 035	150	170	160
	200	1 135	160	200	180
Beton	0	935	180	200	190
	100	1 035	190	210	200
	200	1 135	220	240	230
Tráva	0	935	900	1 050	975
	100	1 035	950	1 100	1 025
	200	1 135	1 100	1 200	1 150

Měření bylo prováděno pomocí siloměru a lana, na jehož jednom konci bylo připevněno tažené vozidlo a na druhém siloměr, přes který bylo vozidlo tažené a ze kterého byly odečítány hodnoty valivého odporu. Pro každou zátěž a povrch bylo provedeno několik měření a ze získaných výsledků byl potom vypočten přibližný průměr, který můžeme v tabulce 14 vidět ve sloupci "Odpor průměrný".

V tabulce 14 jsou uvedeny výsledky měření valivého odporu různě zatíženého vozidla. Co se týče naměřených hodnot pro asfaltový povrch, tak jejich hodnota se pohybuje přibližně okolo hodnoty vypočtené v kapitole týkající se jízdních odporů. Na ostatních dvou površích hodnota není tak přesná, protože vlivem nutnosti vyvinout poměrně velkou sílu pro pohyb vozidla se stává měření tímto způsobem výrazně nepřesné.

Jak je také uvedeno v tabulce 14, tak změna valivého odporu nenarůstala při měření lineárně se zatížením, to je způsobeno zejména nepřesností zátěže, kdy pro měření pro zatížení 200 kilogramy nebyla zátěž přesných 200 kg, ale byla o něco vyšší. I přes tyto potíže lze konstatovat, že shoda naměřených hodnot s údaji v tabulkách je v zásadě dobrá.

Za validaci vypočtených hodnot lze považovat také výsledky z tabulky 12, ve které lze porovnat hodnoty spotřeby teoretické a spotřeby udávané výrobcem. Rovněž i v tomto případě je shoda vypočtených hodnot s údaji výrobce poměrně dobrá.

3 VÝPOČTOVÝ MODEL VOZIDLA S ELEKTROMOTOREM

3.1 Přestavba na elektrický pohon

Cílem práce je porovnání energetické náročnosti vozidel poháněných spalovacím motorem a elektromotorem. Proto, aby bylo možné porovnat vozidla s co nejkvivalentnějšími parametry, je zvolena metoda teoretické přestavby automobilu na elektromobil. Tato přestavba spočívá v demontáži všech komponentů, které souvisí s pohonem vozidla spalovacím motorem a následné montáži komponentů potřebných pro pohon pomocí elektromotoru. Tato přestavba je uvedena v tabulkách 15 a 16 v podobě hmotnostní bilance, protože právě změna hmotnosti bude mít vliv na změnu jízdních odporů a s nimi spojenou změnu spotřeby. Pro tuto přestavbu je zvoleno uspořádání elektrického pohonu podle obrázku 3 z kapitoly 1, tedy pohon pomocí jednoho elektromotoru bez použití převodovky s jedním stálým převodem.

Tabulka 15: Seznam komponentů montovaných a demontovaných

Demontáž			Montáž		
Motor	kg	95	Elektromotor	kg	26
Převodovka	kg	35	Měnič	kg	8
Nádrž	kg	50	Rozvodovka	kg	12
Výfuk	kg	20	Akumulátory	kg	300
Akumulátor	kg	12	Instalační materiál	kg	20
Ostatní	kg	20	Ostatní	kg	20
Celkem	kg	232	Celkem	kg	386

Tabulka 16: Hmotnostní bilance přestavby

Bilance		
Automobil původní	kg	935
Automobil holý	kg	703
Elektromobil	kg	1 089
Nárůst hmotnosti	kg	154

V tabulce hmotnostní bilance (tabulka 16) je uvedeno, že při přestavbě došlo k nárůstu hmotnosti o 154 kg. Tento nárůst je způsoben hlavně montáží akumulátorových baterií, které tvoří, co se týče hmotnosti, nejpodstatnější část přestavby. Jelikož je cílem práce zanechat zbytek vozidla v původním provedení, tak musí být tento nárůst hmotnosti kompenzován snížením užitečného zatížení vozidla, aby nedošlo k jeho přetížení. Jedním z opatření, které je potřeba provést, je snížení počtu přepravovaných osob z pěti na čtyři, čímž se ušetří 75 kg. Dalším opatřením je snížení povoleného zatížení zavazadly. Tato opatření jsou znázorněna v tabulce 17.

Tabulka 17: Snížení užitečného zatížení vozidla

		Benzín	Elektromobil
Celková hmotnost	kg	1420	1420
Hmotnost prázdného vozidla	kg	935	1089
Užitečné zatížení	kg	485	331
Počet cestujících	-	5	4
Hmotnost cestujících	kg	75	75
Zatížení cestujícími	kg	375	300
Zatížení zavazadly	kg	110	31

3.1.1 Akumulátorová baterie

Mezi základní parametry elektromobilu patří zejména kapacita akumulátorové baterie. Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, tak hmotnost akumulátoru je 300 kg. Aby bylo možné zjistit jeho celkovou kapacitu, je třeba znát měrnou kapacitu pro daný typ akumulátoru. Tabulka 18 udává základní parametry lithiové akumulátorové baterie.

Tabulka 18: Parametry lithiové akumulátorové baterie

Parametry Lithiového akumulátoru					
Hmotnost	Měrná kapacita	Energie uložena	Účinnost akumulátoru	Rezerva	Disponibilní energie
kg	kWh/t	kWh	%	%	kWh
300	100	30	90	30	21

Jak je v tabulce vidět, tak měrná kapacita lithiového trakčního akumulátoru je 100 kWh/t, což pro uvažovanou akumulátorovou baterii znamená uloženou energii 30 kWh. Ale jak již bylo zmíněno v teoretické analýze na začátku práce, tak je jako disponibilní energie trakčního lithiového akumulátoru udáváno "pouze" 70% skutečné kapacity nového akumulátoru.

3.1.2 Elektrický pohon

Tato práce se zabývá vozidlem poháněným jedním elektromotorem, jedním měničem a diferenciálem pro rozložení točivého momentu na kola vozidla. Vozidlo je vybaveno synchronním elektromotorem s permanentními magnety, který je schopen dodávat trvalý točivý moment až 94 Nm. Jako většinu elektromotorů jej lze krátkodobě přetížít a to

na 30 sekund, kdy může dosahovat točivého momentu až 128Nm. Více parametrů je uvedeno v tabulce 19.

Tabulka 19: Parametry elektromotoru

Elektromotor		
Typ	-	Synchronní s permanentními magnety
Počet motorů	-	1
Maximální otáčky	<i>ot/min</i>	14 000
Trvalý režim chodu		
Maximální výkon	<i>kW</i>	30
Maximální moment	<i>Nm</i>	94
Krátkodobý režim chodu		
Maximální doba přetížení	<i>s</i>	30
Maximální výkon	<i>kW</i>	50
Maximální točivý moment	<i>Nm</i>	128

Jak je možné vidět, tak otáčky elektromotoru dosahují hodnoty až 14 000 ot/min. Ze vzorce pro výpočet rychlosti vozidla z otáček motoru (vztah 11) je zřejmé, že vozidlo nelze pohánět elektromotorem přímo, ale že je nutné použít převod.

$$v = \frac{n \cdot 2\pi r_k}{i} \quad (11)$$

kde: v rychlost vozidla [m/s]
 n otáčky motoru [ot/s]
 r_k poloměr kol [m]
 i převodový poměr

Tento elektromotor je dodáván již od výrobce s integrovaným převodem s převodovým poměrem 14:1. V tabulce 20 jsou uvedeny i ostatní parametry komponentů přenosu točivého momentu na kola. Součinitel rotačních hmot v této tabulce je zvolen podle ekvivalentního celkového převodu automobilu, lze však předpokládat, že tento součinitel bude pro elektromobil nižší, avšak kvůli nemožnosti přesného určení, je zvolena hodnota spíše o něco vyšší. Stejně tak účinnosti jednotlivých komponentů jsou zvoleny na základě odborného odhadu.

Tabulka 20: Parametry týkající se přenosu točivého momentu

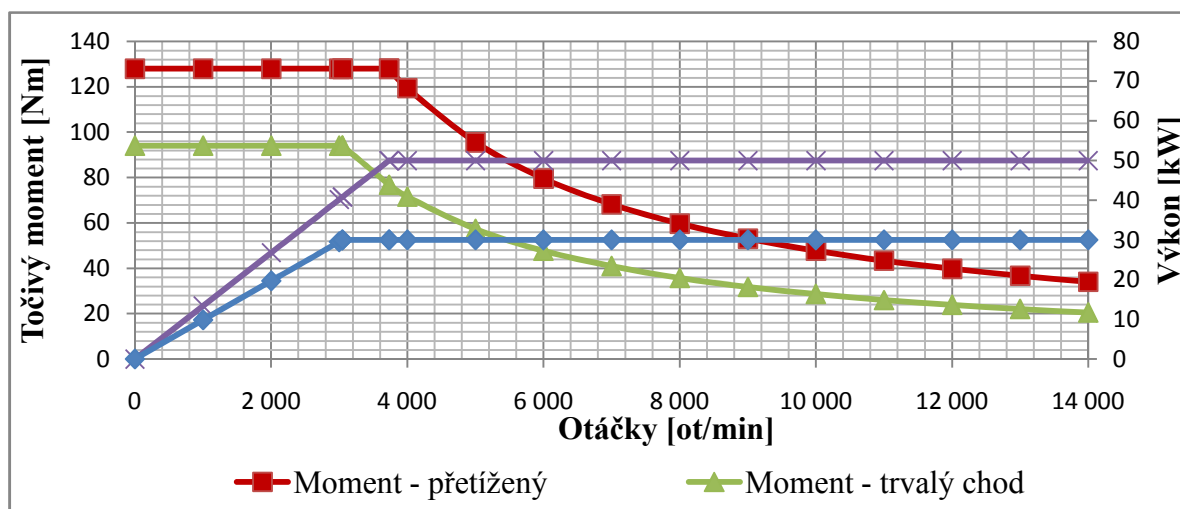
Přenos točivého momentu		
Trakční náprava		přední
Šířka pneumatik	mm	165
Profil pneumatik	%	70
Průměr disků	in	13
Průměr kol nových	mm	561
Maximální rychlost	km/h	100
Počet stupňů převodovky	-	1
Stálý převodový poměr	-	14
Součinitel rotačních hmot	-	1,42
Účinnost přenosu výkonu	%	92
Účinnost motoru	%	96
Účinnost měniče	%	95

3.2 Charakteristiky elektromotoru

Stejně jako u vozidla se spalovacím motorem, tak i u elektromobilu je chování elektromotoru a celého vozidla popsáno charakteristikami.

3.2.1 Momentová charakteristika

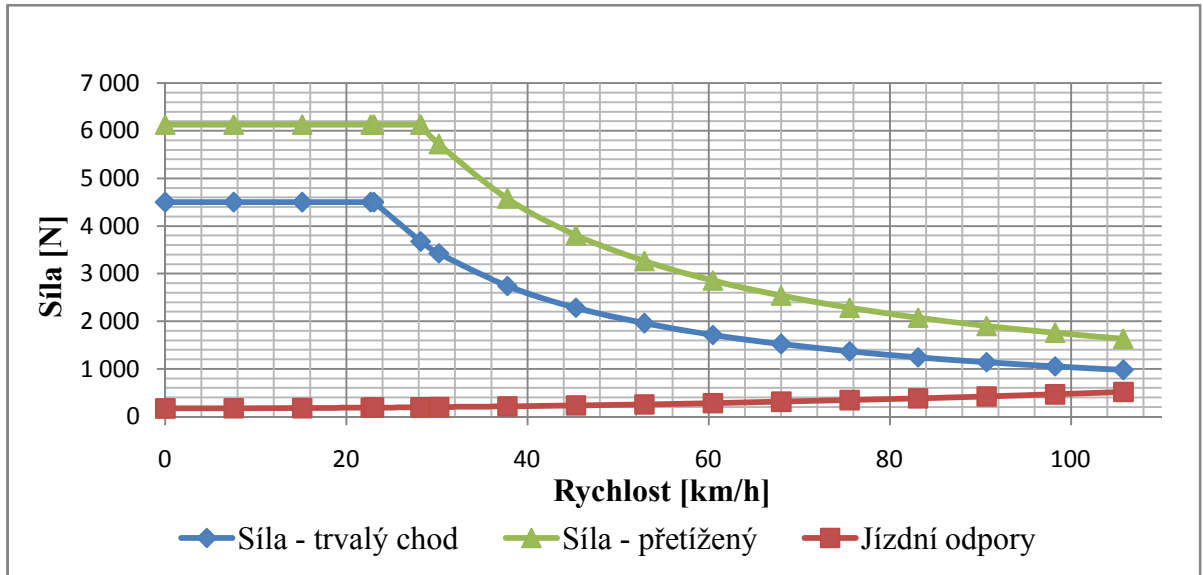
Momentová charakteristika (graf 9) pro elektromotor udává průběhy točivého momentu a výkonu na otáčkách. V grafu 9 vidíme průběhy, jak pro trvalý chod motoru, tak i pro krátkodobé přetížení, ve kterém je motor schopen pracovat až 30 sekund.



Graf 9: Momentová charakteristika

3.2.2 Trakční charakteristika

K tvorbě trakční charakteristiky je opět použito vztahu 2 z kapitoly 2, pro přepočtení točivého momentu na sílu, kterou elektromobil disponuje po obvodu kola. Pro získání výsledné síly je třeba uvažovat účinnost přenosu momentu od elektromotoru na kola, která je pro tento případ 92 %.



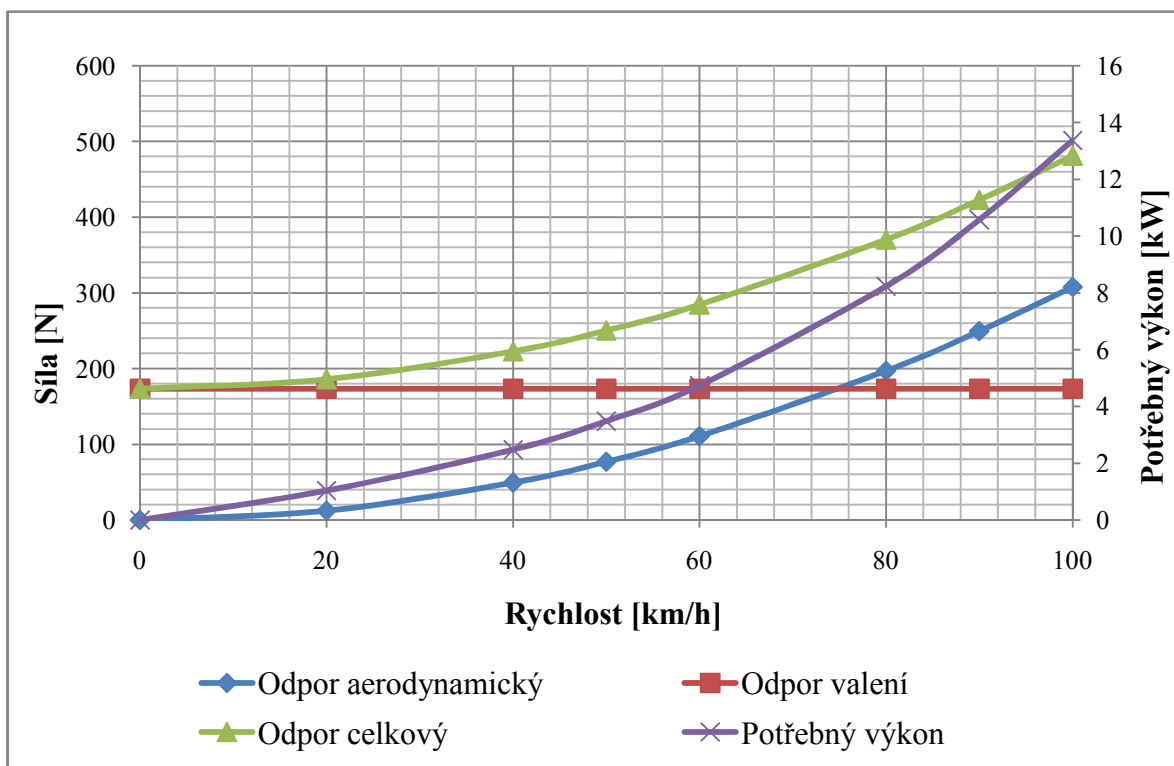
Graf 10: Trakční charakteristika elektromobilu

3.3 Jízdní odpory

Při výpočtech jízdních odporů je postup stejný jako v případě výpočtu pro vozidlo se spalovacím motorem. Vliv na rozdílnost výsledků oproti vozidlu se spalovacím motorem má zejména nárůst hmotnosti vozidla, který ovšem působí negativně pouze na odpor valení, odpor setrvačnosti a odpor stoupání (ten však ve výpočtech není uvažován). Odpor aerodynamický zůstává stejný kvůli použití tytéž karoserie. Zde již není rozebrán každý odpor zvlášť, ale pouze tabulka 21, která udává hodnoty odporů, které jsou zobrazeny také v grafu 11.

Tabulka 21: Jízdní odpory elektromobilu

Jízdní odpory elektromobilu									
v	km/h	0	20	40	50	60	80	90	100
F_a	N	0	12	49	77	111	197	249	308
F_v	N	173	173	173	173	173	173	173	173
F_{celk}	N	173	186	223	250	284	371	423	481
P	kW	0	1	2	3	5	8	11	13



Graf 11: Jízdní odpory elektromobilu

3.4 Zrychlení

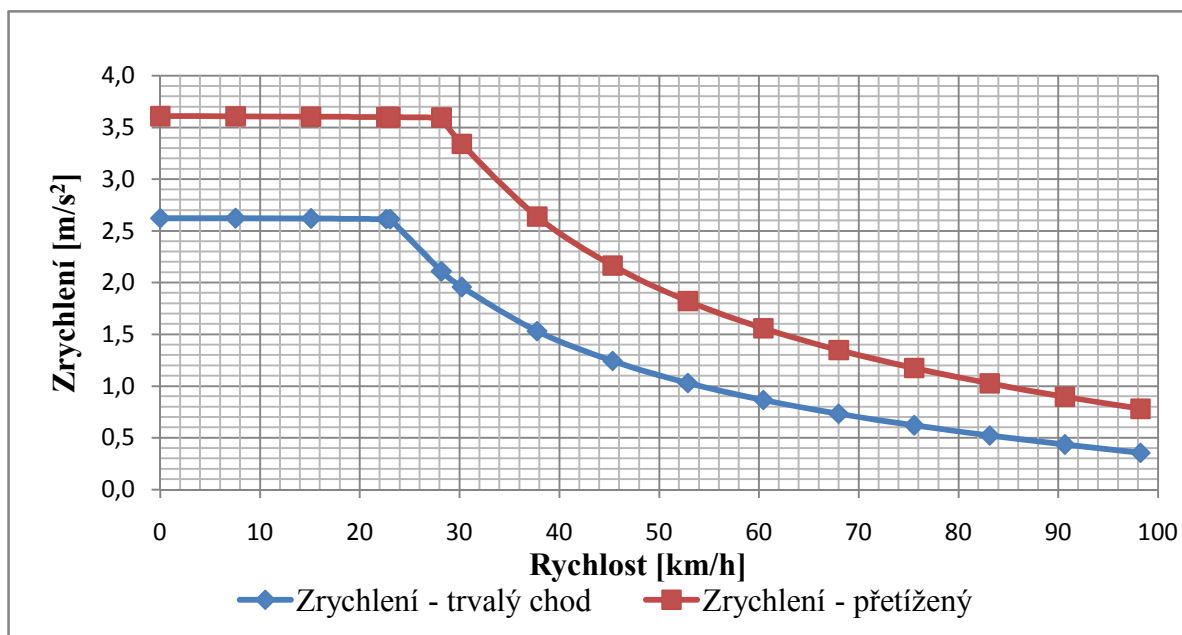
Výpočet zrychlení pro vozidlo s elektrickým motorem opět vychází z pohybové rovnice (vztah 8) a ze vztahu 5 pro výpočet zrychlení vozidla. Jako příklad je v tabulce 22 uvedeno několik hodnot zrychlení elektromobilu.

Tabulka 22: Hodnoty zrychlení elektromobilu

Zrychlení							
		Trvalý chod			Režim přetížení		
Rychlost	Jízdní odpor	Trakční síla	Síla zrychlení	Zrychlení	Trakční síla	Síla zrychlení	Zrychlení
km/h	N	N	N	m/s ²	N	N	m/s ²
30	202	3 430	3 228	1,9	5 717	5 515	3,3
60	286	1 715	1 429	0,9	2 859	2 573	1,5
90	428	1 143	717	0,4	1 906	1 478	0,9

Po propočítání zrychlení pro více hodnot rychlosti v tabulkovém procesoru lze zobrazit celý průběh do grafu (graf 12). Pro lepší představu a porovnání s jiným vozem lze

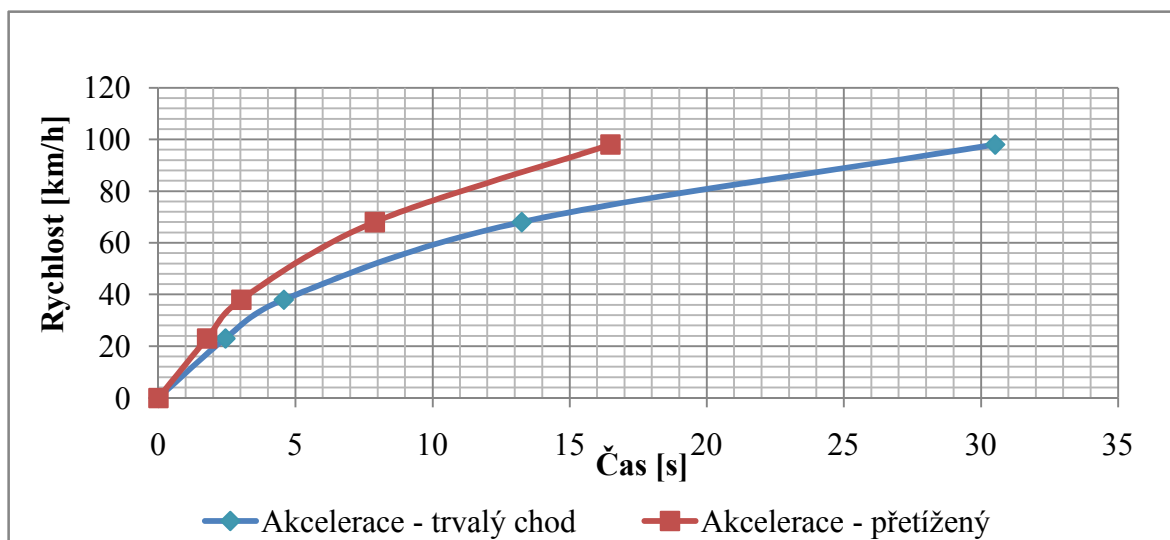
také na základě vztahu 9 zobrazit graf zrychlení v podobě závislosti okamžité rychlosti na čase, při rozjezdu elektromobilu (graf 13). Hodnoty pro graf 13 jsou uvedeny v tabulce 23.



Graf 12: Zrychlení elektromobilu

Tabulka 23: Závislost rychlosti na čase při akceleraci elektromobilu

Zrychlení							
		Trvalý chod			Přetížení (30 s)		
v	dv	a	dt	t	a	dt	t
km/h	m/s ²	m/s ²	s	s	m/s ²	s	s
0	-	-	-	0	-	-	0
	6,4	2,6	2,5		3,6	1,8	
23	4,1	1,9	2,2	2,5	3,2	1,3	1,8
	8,4	1,0	8,8		1,7	4,9	
38	8,4	1,0	8,8	4,6	1,7	4,9	3,1
	8,3	0,5	17,5		1,0	8,7	
68	8,3	0,5	17,5	13,4	1,0	8,7	8,0
	-	-	-		-	-	
98	-	-	-	31,0	-	-	16,7
	-	-	-		-	-	



Graf 13: Závislost rychlosti na čase při akceleraci elektromobilu

3.5 Výpočet energetické náročnosti provozu elektromobilu

Tato část práce se zabývá určením energetické náročnosti vozidla s elektrickým pohonem. Aby byla dodržena určitá analogie s výpočtovým modelem pro spalovací motor, tak zde musí být zohledněn tok energie celým řetězcem, tedy od nabíjení baterie až po přenos síly na vozovku. Důkladnějšímu propočtu energetické náročnosti výroby elektrické energie se věnuje další kapitola.

Nejprve, stejně jako v situaci pro vozidlo se spalovacím motorem, je stanoveno několik ustálených jízdních režimů a dopočtena spotřeba energie podle vztahu 9.

Tabulka 24: Potřebná energie dodaná z akumulátorové baterie

Rychlost	Jízdní odpor	Ujetá dráha	Trakční práce na 100 km	Účinnost měniče	Účinnost motoru	Účinnost převodu	Energie dodaná z akumulátoru
<i>km/h</i>	<i>N</i>	<i>km</i>	<i>kWh/100km</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>kWh/100km</i>
50	250	100	6,9	95	96	92	8,2
80	371	100	10,3	95	96	92	12,3
90	423	100	11,8	95	96	92	14

Na rozdíl od vozidla se spalovacím motorem, kde z hlediska koncového uživatele energetický řetězec končil (začínal) u plné nádrže, zde musí být připočítána ještě energie zmařená při nabíjení akumulátorových baterií (znázorněno v tabulce 25).

Tabulka 25: Energie potřebná pro jízdu elektromobilu (spotřebovaná při nabíjení)

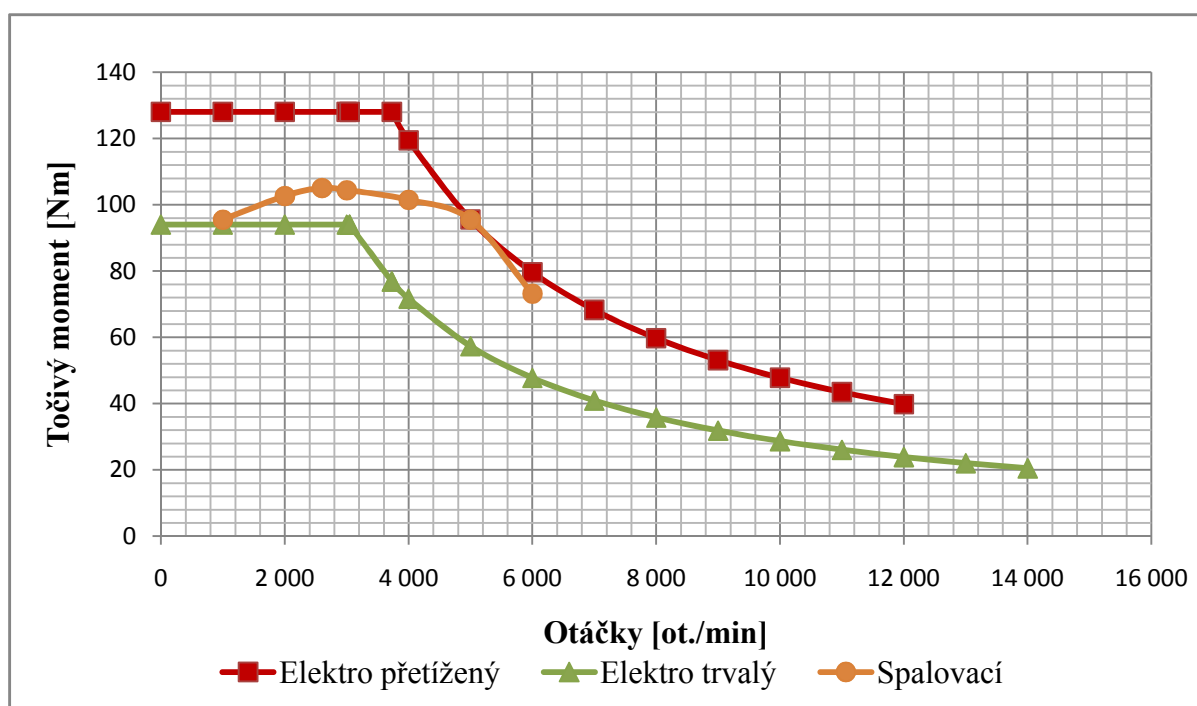
Rychlost	Energie dodaná z akumulátoru	Účinnost nabíječe	Účinnost baterií	Energie dodaná ze sítě
km/h	kWh/100km	%	%	kWh/100km
50	8,2	90	90	10,1
80	12,3	90	90	15,0
90	14	90	90	17,1

4 POROVNÁNÍ POHONŮ

4.1 Charakteristiky motorů

4.1.1 Momentová charakteristika

Na první pohled patrné rozdíly obou motorů jsou z grafu 14. Jedná se o diametrální rozdíly zejména v rozsahu otáček, ve kterém jsou srovnávané motory schopny pracovat. Zatímco motor spalovací je svým průběhem momentu bez použití převodovky zcela nevhodný, tak charakteristika elektromotoru je pro pohon vozidla téměř ideální. Avšak pro praktické využití celého spektra otáček elektromotoru (0 - 14 000 ot/min), jak už bylo uvedeno dříve, je třeba použít dodatečný převod. Další výhodou elektromotoru je dostupnost maximálního točivého momentu od nulových otáček, což zaručuje bezproblémové a hbité rozjezdy vozu, na rozdíl od spalovacího motoru, kde musíme pro rozjezd použít spojku.

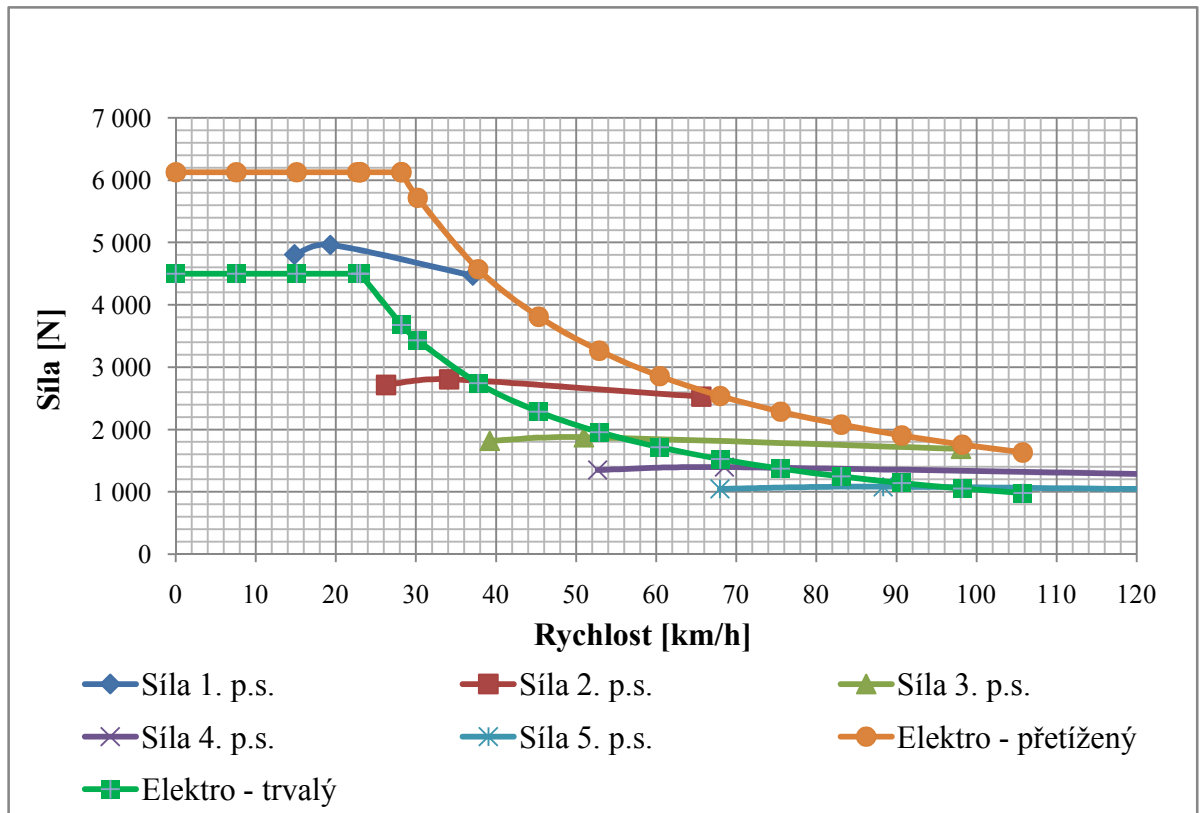


Graf 14: Porovnání momentových charakteristik

4.1.2 Trakční charakteristika

V grafu 15 lze vidět proložené trakční charakteristiky obou pohonů. Z tohoto grafu je zřejmé, jak díky vhodně zvoleným převodovým poměrům převodovky, kopírují průběhy sil jednotlivých zařazených rychlostních stupňů tvar trakční charakteristiky elektromotoru. Při pohledu na průběh trakční charakteristiky elektromotoru je zřejmé, že i když dosahuje

podobného maximálního výkonu jako motor spalovací, nabízí výrazně lepší průběh trakční charakteristiky.



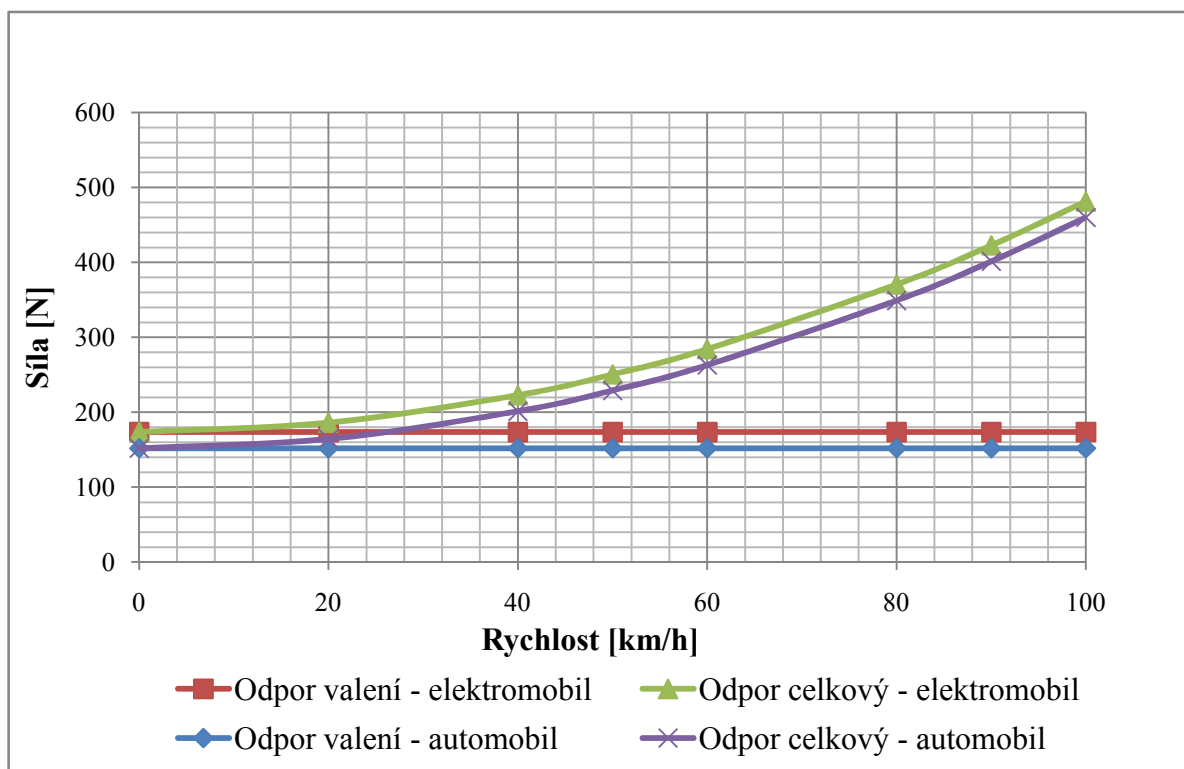
Graf 15: Porovnání trakčních charakteristik

4.2 Jízdní odpory

Změna jízdních odporů spočívá především v rozdílné hmotnosti obou vozidel. Rozdíl hmotností činí 154 kg (podle tabulky 16) v neprospěch elektromobilu. Nárůst hmotnosti bude hrát roli v odporu valivém a odporu setrvačném. Naopak bezvýznamný je z hlediska jízdních odporů v ohledu aerodynamickém. Změnu hodnot jízdních odporů po přestavbě znázorňuje tabulka 26 a graf 16.

Tabulka 26: Porovnání jízdních odporů

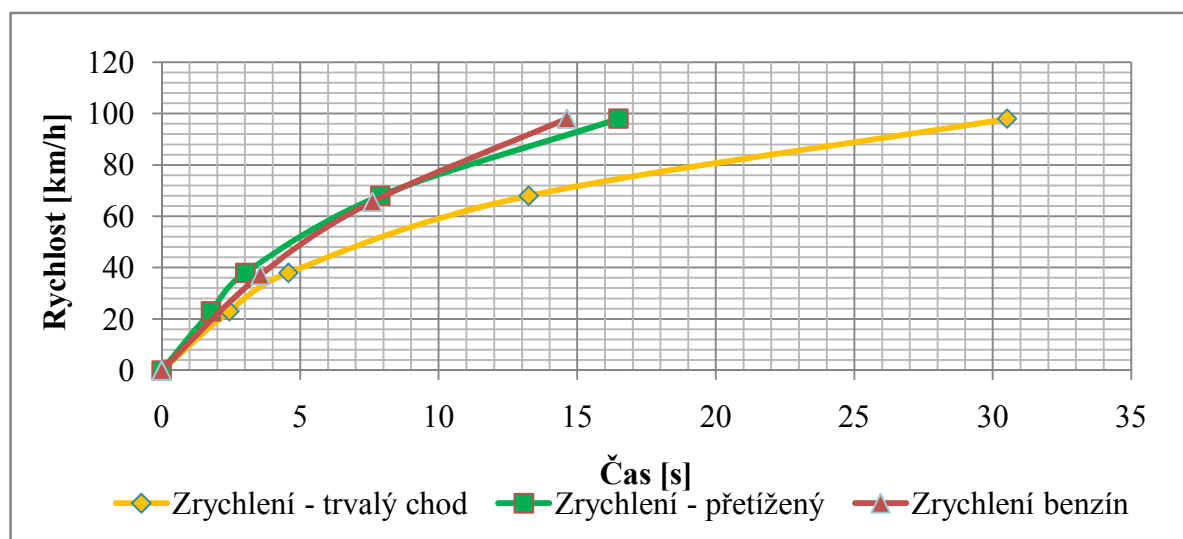
Jízdní odpory elektromobilu									
v	km/h	0	20	40	50	60	80	90	100
F_{aero}	N	0	12	49	77	111	197	249	308
F_{val}	N	173	173	173	173	173	173	173	173
F_{celk}	N	173	185	222	250	284	370	422	481
Jízdní odpory automobilu									
F_{aero}	N	0	12	49	77	111	197	249	308
F_{val}	N	152	152	152	152	152	152	152	152
F_{celk}	N	152	164	201	229	263	349	401	460



Graf 16: Porovnání jízdních odporů

V tabulce 26 je uvedeno, že navýšení valivého odporu je přibližně 21 N, což představuje přírůstek 14% oproti hodnotě tohoto odporu pro vozidlo se spalovacím motorem. Přírůstek 21 N se projeví samozřejmě i v celkovém jízdním odporu, kde se ovšem s narůstající rychlostí bude jeho procentuelní podíl na celkovém odporu snižovat.

4.3 Zrychlení



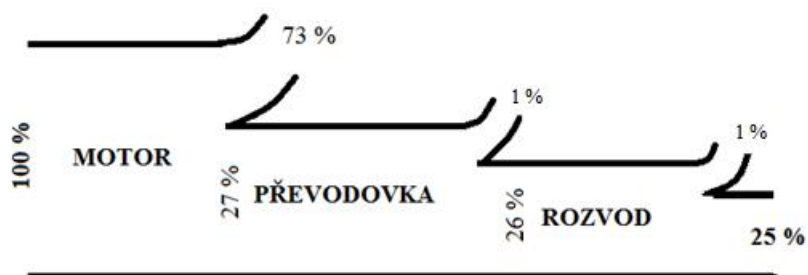
Graf 17: Porovnání akcelerace

V grafu 17 lze porovnat průběhy akcelerace obou variant. Pokud srovnáme trakční charakteristiky (graf 15) spalovacího motoru a elektromotoru v režimu krátkodobého přetížení, tak je jasné, že elektromotor nabízí větší moment v celém spektru otáček. Zde (graf 17) však lze vidět téměř srovnatelné průběhy akcelerace, což je dáno navýšením odporových sil způsobeným přírůstkem hmotnosti a součinitele rotačních hmot, jak je patrné ze vztahu 5.

4.4 Účinnost vozidel

Tato kapitola je pro výslednou energetickou náročnost vozidel nejdůležitější. Jak již bylo zmíněno, pro každou z porovnávaných variant pohonu, musí být uvažován jiný řetězec komponentů a tedy i jejich účinnosti.

Co se týká vozidla se spalovacím motorem, tak zde musí být zohledněna účinnost motoru, převodovky a rozvodovky. Oproti vozidlu s elektromotorem je to podstatně méně komponentů, ale proti hovoří zejména velice nízká účinnost spalovacího motoru. Tento případ je zobrazen na obrázku 8.



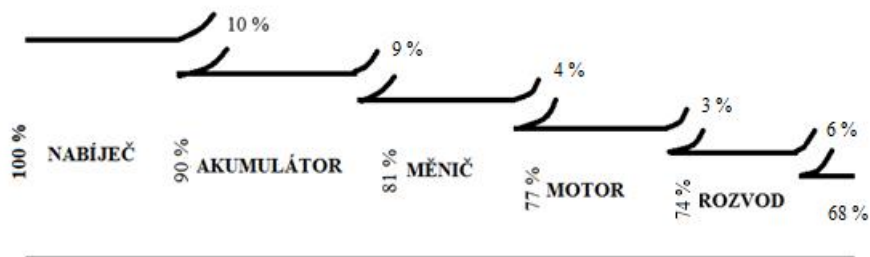
Obrázek 8: Řetězec účinností automobilu

Pravdivost řetězce účinností je ověřena výpočtem v tabulce 27. Výsledek lze porovnat s tabulkou 13.

Tabulka 27: Ověření vypočtených účinností řetězce automobilu

Rychlost	Trakční práce na 100 km	Účinnost automobilu	Energie z paliva
km/h	kWh/100 km	%	kWh/100 km
50	6,3	25	25
80	9,7	25	38
90	11,1	25	44

Na rozdíl od vozidla se spalovacím motorem je vůz s elektromotorem navíc vybaven, jak již bylo zmíněno, komponenty jako je frekvenční měnič pro řízení motoru a nabíječ. Krom toho je ještě při nabíjení zatížen ztrátami v akumulátorové baterii. Oproti vozidlu se spalovacím motorem však nabízí výhodu v podobě vysoce účinného synchronního motoru s permanentními magnety a absenci převodovky. Řetězec účinností pro elektromobil je zobrazen na obrázku 9 a ověřen výpočtem v tabulce 28. Výsledky z tabulky 28 je opět možné porovnat s tabulkou 24.



Obrázek 9: Řetězec účinností elektromobilu

Tabulka 28: Ověření vypočtených účinností elektromobilu

Rychlost	Trakční práce na 100 km	Účinnost elektromobilu	Energie ze sítě
km/h	kWh/100km	%	kWh/100 km
50	6,9	69	10
80	10,3	69	15
90	11,7	69	17

4.5 Ekonomická náročnost provozu

Do ekonomické stránky provozu vozidla patří náklady na vynaloženou energii ve formě spotřebovaného benzínu respektive elektrické energie, ale také náklady na údržbu a opravy vozidla (amortizace).

4.5.1 Náklady na údržbu

Mezi náklady na údržbu je zahrnuta většina servisních úkonů, které je třeba provádět pro bezproblémový chod vozidla v přibližně stejných intervalech, za předpokladu celoročního používání. Tyto intervaly jsou odvozené ze zkušeností majitelů a z intervalů údržby předepsaných výrobcem vozu. Je nutné podotknout, že zmíněné vozidlo nevyniká valnou spolehlivostí, ale na druhou stranu ceny náhradních dílů jsou pouze zlomkem ceny dílů pro vozidla vyrobená v dnešní době. Do těchto nákladů nejsou samozřejmě zahrnuty ty, které jsou u obou vozů stejné (pneumatiky, brzdy, stěrače atd.). Jako zvýhodnění pro elektromobil by zde mohlo být uvedené ještě levnější povinné ručení, menší opotřebení brzd nebo odpadnutí povinnosti jezdit na emisní prohlídky. Tím by se měly vykompenzovat náklady na určité preventivní kontroly baterií, popřípadě občasná nutnost kontroly a vyčištění měničů. Jinak lze považovat elektromobil za bezúdržbový. Často se mluví o bateriích, jako o choulostivé části elektromobilu. V dnešních elektromobilech jsou však baterie na takové úrovni, že jejich životnost není takřka o nic menší, než životnost ostatních komponentů vozidla. Výrobci udávají u moderních baterií až 4000 nabíjecích cyklů a ani potom není baterie zničena, ale pouze klesá její kapacita. V této práci je hodnota nabíjecích cyklů snížena na stranu bezpečnou, a sice na 3500 nabíjecích cyklů. Pokud průměrně ujede vozidlo na jedno nabití 100 km, pak bude životnost baterií 350 000 km. Jak je uvedeno v tabulkách 29, 30 a 31, tak celkové náklady na údržbu vozidla, při započtení životnosti akumulátoru jsou menší v případě spalovacího pohonu. Při této skutečnosti je nutné zohlednit také fakt, že baterii je nutno zakoupit již při pořízení nového vozidla, ale tím v podstatě odpadají starosti

s odstávkou vozidla za účelem výměny opotřebovaných dílu, jako je tomu u vozidla se spalovacím motorem.

Tabulka 29: Náklady na údržbu automobilu

Údržba automobilu									
Servisní úkon		Klínový řemen	Zapalovací svíčky	Výfuk	Spojka	Vzduchový filtr	Olej	Rozvody	Celkem
Interval	Km	60 000	50 000	50 000	150 000	30 000	15 000	120 000	-
Cena	Kč	800	500	2 000	5 000	400	1 000	4 000	-
Měrné náklady	Kč/km	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,07	0,03	0,21

Tabulka 30: Náklady na údržbu elektromobilu

Údržba elektromobilu		
Servisní úkon	-	Výměna akumulátoru
Interval	km	350000
Cena	Kč	210000
Měrné náklady	Kč/km	0,6

Tabulka 31: Porovnání nákladů na údržbu

Porovnání nákladů na údržbu		
	Měrné náklady na údržbu	Měrné náklady na údržbu
	Kč/km	Kč/100km
Automobil	0,21	21
Elektromobil	0,6	60

4.5.2 Náklady na energii (palivo)

Při výpočtu výše nákladů na energii vozů je počítáno s průměrnými cenami obou paliv. Cena elektrické energie je brána pro snížený osmihodinový tarif určený pro noční nabíjení elektromobilu[7], tedy 2,30 Kč. Tato cena je pouze orientační, skutečná cena závisí na dalších parametrech jako typ instalovaného hlavního jističe atd. Pro lepší demonstraci výsledků, jsou zavedeny přibližné průměrné hodnoty spotřeby energie a benzínu. U benzínového vozidla udává výrobce průměrnou hodnotu spotřeby 7 l/100km, což

představuje 40 % nárůst oproti jízdě konstantní rychlostí 90 km/h. Za předpokladu dodržení stejného modelu při určení průměrné spotřeby vozidla s elektromotorem, vyjde hodnota 18,4 kWh/100km, což je ale energie odebraná z akumulátoru vozidla. Bude-li tato hodnota ještě navýšena o ztráty při nabíjení, vychází hodnota energie na 22,8 kWh/100km odebraných ze sítě. Průměrná spotřeba elektromobilu by měla být pochopitelně navýšena více, jakožto důsledek nárůstu hmotnosti, tato skutečnost je však kompenzována nezapočítáním úspory energie díky rekuperaci, která by v kombinovaném provozu činila přibližně 10% úspory.

Tabulka 32: Náklady na energii pro provoz elektromobilu

Náklady na energii - elektromobil			
Rychlost	Odebráno ze sítě	Cena energie	Náklady na energii
km/h	kWh/100km	Kč/kWh	Kč/100 km
50	10	2,3	23
80	15	2,3	34,5
90	17	2,3	39
Průměr	22,8	2,3	52,4

Tabulka 33: Náklady na palivo pro provoz automobilu

Náklady na palivo - automobil			
Rychlost	Průměrná spotřeba	Cena benzínu	Náklady na palivo
km/h	l/100km	Kč/l	Kč/100km
50	2,6	35	91
80	3,9	35	137
90	4,5	35	158
Průměr	7	35	245

4.5.3 Celkové náklady na provoz

Po zahrnutí nákladů na pořízení nové baterie do elektromobilu už zdaleka nevychází tak rozdílná čísla. Jak je uvedeno v tabulce 34, tak se ale stále hodnota celkových nákladů na provoz elektromobilu pohybuje okolo poloviny nákladů na provoz automobilu se spalovacím motorem. Při průměrném nájezdu 20 000 kilometrů za rok tedy vychází návratnost ceny akumulátorové baterie na dobu okolo 10 let provozu.

Tabulka 34: Srovnání celkových nákladů na provoz

Celkové náklady na provoz				
	Náklady na energii/palivo	Náklady na údržbu	Celkové náklady na provoz	Celkové náklady na provoz
	Kč/km	Kč/km	Kč/km	Kč/100km
Automobil	245	21	266	2,7
Elektromobil	52	60	112	1,2

4.6 Dojezd vozidel

Pro porovnání dojezdu obou verzí vozidla, lze opět vycházet z průměrné spotřeby. Tentokrát ovšem pro elektromobil s hodnotou 18,5 kWh/100 km. To je totiž hodnota energie, která musí být dodána z akumulátorové baterie. Z těchto údajů je možné sestavit tabulku 35, pro přímé srovnání dojezdů obou verzí.

Tabulka 35: Srovnání dojezdu obou uvažovaných verzí vozidla

Elektromobil			Automobil		
Energie v akumulátoru	Průměrná spotřeba	Dojezd	Obsah nádrže	Průměrná spotřeba	Dojezd
kWh	kWh/100km	km	l	l/100km	km
21	18,5	114	40	7	571

Tabulka 35 ukazuje, že dojezd automobilu a elektromobilu takřka nelze srovnávat. Zatímco automobil je schopen ujet na plnou nádrž až 571 km, tak elektromobil na jedno nabití pouhých 114 km. K zamyšlení je zde fakt, že pro běžné (nekomerční) užití většinou dojezd, jakým disponuje automobil, není potřebný. Podle průzkumů [5] je většina soukromých cest automobilem v ČR uskutečněna s maximálním nájezdem 80 km za den.

Důležitým parametrem při používání vozidla s elektrickým pohonem je doba nabíjení akumulátoru. Pro srovnání s vozidlem poháněným spalovacím motorem jsou sestaveny tabulky 36 a 37, které udávají čas potřebný pro nabíjení vozidla s elektrickým motorem a čas potřebný pro čerpání paliva do nádrže vozidla se spalovacím motorem. V tabulce 36 je uvedený čas nabíjení v domácích podmínkách. Za použití dobíjecích stanic uvedených v kapitole 1 by bylo možné nabíjet ještě vyšším výkonem, ale zde je nutno zohlednit také maximální možný nabíjecí výkon akumulátorové baterie. Nejkratší čas pro plné nabití běžných vozidel s elektrickým motorem bývá okolo 2 hodin.

Tabulka 36: Nabíjení elektromobilu

Energie v akumulátoru	Dojezd	Nabíječ	Příkon nabíječe	Účinnost nabíjení	Doba nabíjení
kWh	km	-	kW	%	h
21	114	1f 16A 230V	3,6	81	7,2
		3f 32A 400V	12,8		2,0

Tabulka 37: Čerpání paliva

Dojezd	Spotřebováno paliva	Průtok	Doba čerpání paliva
km	l	l/min	min
114	8	15	0,5

Tabulka 38: Disponibilita vozidel

Palivo	Dojezd	Průměrná rychlost	Doba provozu	Doba čerpání paliva	Disponibilita
-	km	km/h	min	min	%
Elektro	114	50	136,8	121,5	53
Benzín			136,8	0,5	99,6

Z výsledků v tabulkách 36 a 37 je možné vypočítat také hodnotu disponibility obou modelů. Jak vidíme v tabulce 38, tak disponibilita je neporovnatelná, ovšem stále zůstává otázkou, pro jaké účely bude koncový uživatel vozidlo s elektrickým pohonem využívat, tedy zda je doba nabíjení překážkou nebo je využit čas vyhrazený k parkování.

4.7 Celková energetická náročnost

Prozatím se práce zabývala provozem automobilu a elektromobilu pouze z pohledu uživatele. Vyčísleny byly účinnosti pohonů a náklady na provoz, ale pokud jde o výpočet celkové energetické náročnosti vozidel, je nutné zde zohlednit také energii vynaloženou na těžbu, zpracování a přepravu ropy, v případě elektromobilu výrobu a přepravu elektrické energie.

Pro výpočet energetické náročnosti těžby a přepravy primárních zdrojů (uhlí, plyn, ropa atd.) slouží index EROEI. Tento index říká jaká část energie primárního zdroje je potřeba pro jeho těžbu, přepravu a zpracování. Tento index je často kritizován, zejména proto, že není možné přesně určit a paušalizovat energetickou náročnost jednotlivých výrobních a těžebních postupů, už jen proto, že se tyto postupy stále vyvíjejí a mění. Jako příklad hodnoty tohoto indexu lze uvažovat těžbu ropy: Index EROEI pro ropu z blízkého východu

má v dnešní době hodnotu okolo 30, což znamená, že pokud je získáno například 30 barelů ropy, tak energie jednoho barelu byla spotřebována pro těžbu, přepravu, uskladnění atd[12].

4.7.1 Vozidlo se spalovacím motorem

Situace s vyčíslením energetické náročnosti získání benzínu pro provoz automobilu tedy není nikterak složitá. Index EROEI pro benzín se v dnešní době pohybuje okolo hodnoty 8[12]. Je tedy možné sestavit tabulku pro výpočet celkové energetické náročnosti vozidla poháněného zážehovým motorem (tabulka 39).

Tabulka 39: Celková energetická náročnost provozu automobilu

Benzín				
Rychlost	Potřebná energie v palivu	Index EROEI	Spotřebováno výrobou	Celkově spotřebováno
km/h	kWh/100km	-	kWh/100 km	kWh/100 km
50	25	8	3,1	28,1
80	38	8	4,8	42,8
90	44	8	5,5	49,5
Průměr	69	8	8,6	77,6

Nyní lze popsat celý proces přenosu energie od těžby ropy, až po konečné využití v podobě energie na kole vozidla celkovou účinností celého řetězce, jak je uvedeno v tabulce 40.

Tabulka 40: Účinnost řetězce přenosu energie z ropného ložiska až na vozovku

Benzín			
Rychlost	Trakční práce	Energie v ropě	Účinnost řetězce
km/h	kWh/100km	kWh/100 km	%
50	6,4	28,1	23
80	9,7	42,8	23
90	11	49,5	23

Z celkové energie ropy, uložené v ropném ložisku, je tedy přeneseno na kola vozidla poháněného spalovacím zážehovým motorem 23 % energie.

4.7.2 Vozidlo s elektrickým motorem

Výpočet celkové energetické náročnosti pro elektromobil je do jisté míry složitější. Jedná se zde hned o několik problémů. Prvním z nich je skutečnost, že celková účinnost elektrické energie závisí především na podílu jednotlivých typů elektráren na celkovém energetickém mixu. Což představuje odlišnou účinnost výroby pro jednotlivá území v závislosti na zastoupení jednotlivých typů elektráren. Tato práce se však zabývá výpočtem pro ČR. Dalším problémem při výpočtu energetické náročnosti elektromobilu je vyčíslení ztrát v rozvodné síti, kde účinnost závisí v podstatě na "trase" elektrické energie z elektrárny až po zásuvku, kde je daný elektromobil nabíjen. Je tedy zřejmé, že hodnota účinnosti rozvodné sítě se odvíjí od místa nabíjení, kde závisí především na okamžitém zatížení. Pro dosažení přesných výsledků by musel být popsán konkrétní stav elektrické energie pro každé konkrétní nabíjecí místo, pro účely této práce bude však postačující orientační příklad zobrazený na obrázku 10. Z údajů společností ČEPS a ČEZ vyplývá, že průměrné ztráty v přenosové soustavě jsou 3 %. Dále pak ztráty na distribuční síti se pohybují okolo 6 %. Ztráty na vedení jsou tedy poměrně malé, vzhledem k velké vzdálenosti, na kterou je energie přepravována, to je umožněno zejména díky transformaci energie na velké napětí a malý proud, kdy je možné přepravovat velké množství energie na velké vzdálenosti s malými ztrátami.

Přenosová soustava				Distribuční soustava				
Transformace	Vedení	Transformace	Vedení	Transformace	Vedení	Transformace	Vedení	
10,5/ 400 kV	400 kV	400 kV/ 110kV	110 kV	110 kV/ 22 kV	22 kV	22 kV/ 0,4 kV	0,4 kV	
100 %		97 %		94 %				91 %

Obrázek 10: Řetězec průměrných účinností na rozvodné síti

Nyní když je známa účinnost vozidla s elektromotorem i rozvodné sítě, je třeba ještě zjistit účinnost výroby elektrické energie a výše náročnosti těžby primárních zdrojů. Jak již bylo napsáno, tak účinnost výroby elektrické energie závisí na složení energetického mixu. Současný energetický mix v ČR je znázorněn v tabulce 41[11]. V tabulce je uvedena také hodnota indexu EROIE pro jednotlivé způsoby výroby elektrické energie.

Tabulka 41: Současné složení energetického mixu ČR.

Typ elektrárny	Výroba ročně	Zastoupení v ČR	Průměrná účinnost výroby el. energie	Index EROEI
	kWh	%	%	-
Uhelná	48 988	59,1	38	7
Jaderná	27 998	33,8	36	55
Vodní	2800	3,4	75	100
Plynová	2 205	2,7	58	20
Větrná	335	0,4	70	20
Fotovoltaika	615	0,7	18	15

Zdroj [11]

Jak je uvedeno v tabulce 41, tak nejvýhodnější (z pohledu vlastní spotřeby energie) je výroba elektrické energie pomocí VTE, kde index EROEI dosahuje hodnoty až 100 vyrobených jednotek energie na jednu spotřebovanou. Naopak nízký index mají FVE a elektrárny spalující uhlí. Tato práce vychází z energetických hodnot v tabulce 41, ale pokud by bylo třeba důsledně porovnat energetickou výnosnost obnovitelných zdrojů a energie získané z fosilních paliv, tak by bylo nutné vzít v úvahu také fakt, že energie uložená ve fosilních palivech se zde ukládala miliony let za působení přírodní energie, kterou však nelze vyčíslit. Získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů je tedy v konečném důsledku nesrovnatelně výhodnější, než získávání energie z fosilních vyčerpatelných paliv.

Pro výpočet celkové energetické náročnosti je třeba vyčíslit nároky na množství energie na výstupu z elektrárny. Stanovení výše těchto nároků je znázorněno v tabulce 42 a spočívá v navýšení energie potřebné pro pohyb vozidla o ztráty ve vozidle samotném a také o ztráty na vedení.

Tabulka 42: Požadavek na množství energie vyrobené v elektrárně potřebné pro provoz elektromobilu

Rychlost	Trakční práce	Účinnost elektromobilu	Účinnost přenosu elektrické energie	Energie na výstupu z elektrárny
<i>km/h</i>	kWh/100km	%	%	kWh
50	6,9	69	91	11
80	10,3	69	91	16,4
90	11,8	69	91	18,8
Průměr	15,5	69	91	24,7

Pro jednotlivé rychlosti je sestrojena tabulka 43, ve které je propočítána celková spotřebovaná energie pro pohyb vozidla určitou rychlostí. Tabulka 43 slouží jako příklad výpočtu a platí pro rychlost 90 km/h. Shrnutí výsledků pro všechny rychlosti je uvedeno v tabulce 44.

Tabulka 43: Výpočet celkové spotřebované energie z primárních zdrojů pro provoz elektromobilu při konstantní rychlosti 90 km/h a ujeté vzdálenosti 100 km

Potřebná energie	Typ elektrárny	Zastoupení v ČR	Podíl na výrobě	Účinnost výroby el. energie	Energie primárního zdroje	Index EROEI	Vlastní spotřeba energie	Celková spotřeba
kWh		%	kWh	%	kWh	-	kWh	kWh
18,8	Uhlí	59,1	11,1	38	29,2	7	4,2	33,4
	Jaderná	33,8	6,3	36	17,6	55	0,3	17,9
	Vodní	3,4	0,6	75	0,8	100	0,01	0,9
	Plyn	2,7	0,5	58	0,9	20	0,04	0,9
	Větrná	0,4	0,1	70	0,1	20	0,01	0,1
	Fotovoltaika	0,7	0,1	18	0,8	15	0,05	0,8
Celkem	-	100	18,8	-	49,4	-	4,6	54,0

Tabulka 44: Účinnost řetězce přenosu elektrické energie

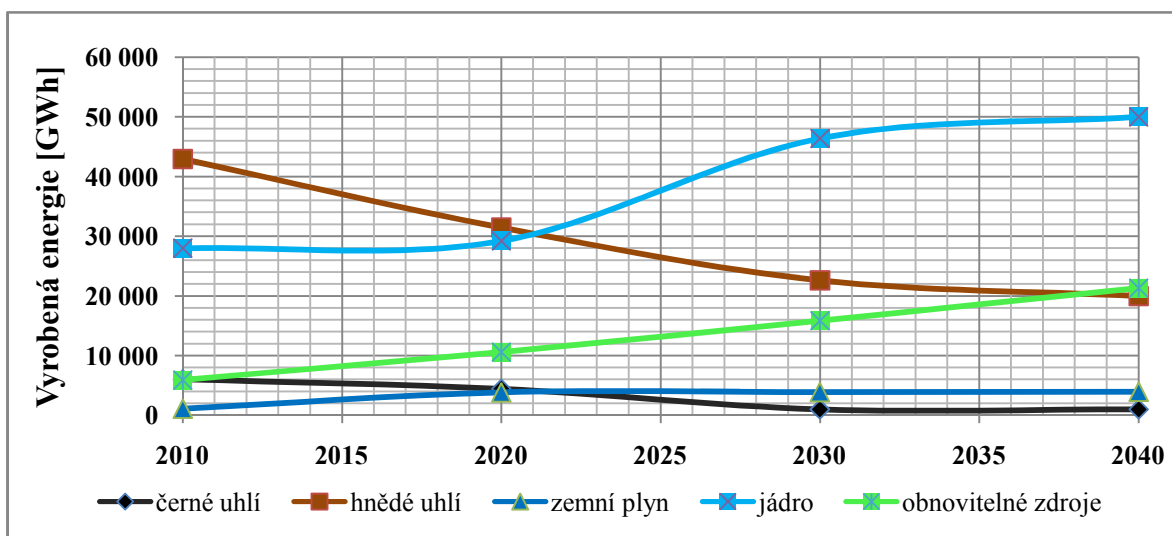
Rychlost	Trakční práce	Celková spotřeba	Účinnost řetězce
km/h	kWh/100km	kWh/100km	%
50	6,9	31,6	22
80	10,3	47,1	22
90	11,8	54	22

Jak je vidět z tabulky 44, tak účinnost celého řetězce přenosu energie z primárních zdrojů až po výslednou trakční práci je 22%. Jak bylo již zmíněno, tak energetická náročnost závisí na složení energetického mixu. Sestrojený graf 18 znázorňuje odhad vývoje energetického mixu v ČR až do roku 2040. Podle tohoto odhadu [11] by se složení energetického mixu do roku 2040 mělo výrazně změnit (tabulka 45). Zásadní změny proběhnou zejména v odvětví jaderné a uhelné energetiky, kdy poklesne výroba elektrické energie z uhlí ze současných 59 % téměř na třetinu a naopak jaderná energetika stoupne ze současných 33 % na 55%. Výrazný nárůst zaznamená i výroba elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, která stoupne ze současných 10 % na 20 %. Pokud bychom zanedbali vývoj účinností jednotlivých typů elektráren, tak by se následkem vývoje energetického mixu tímto směrem účinnost výroby elektrické energie nijak zvláště nezměnila, ale díky současnému navýšení podílu "čistých" zdrojů energie a poklesu zdrojů "špinavých" bude mít velice zásadní pozitivní dopad na životní prostředí, jak bude ukázáno v další kapitole.

Tabulka 45: Vývoj energetického mixu v ČR

Vývoj energetického mixu				
Typ elektrárny	2014	2020	2030	2040
Uhlí	59	47	28	23
Jaderná	33	38	55	55
Vodní	3	4	3	3
Plyn	3	7	6	6
Větrná	0,4	1	3	5
Fotovoltaika	1	3	5	8

Zdroj [11]



Graf 18: Vývoj energetického mixu v ČR

Při srovnání tabulek 40 a 44 vidíme, že i přes to, že elektrický pohon jako takový je proti spalovacímu několikanásobně účinnější, tak výsledná energetická náročnost je pro oba pohony srovnatelná. To je dáno zejména obrovským obsahem energie uložené v ropě a poměrně náročným procesem výroby a přenosu energie elektrické. Nelze však zapomínat, že jde o neopakovatelné čerpání fosilního zdroje.

4.8 Produkce CO₂

Tato kapitola se zabývá porovnáním exhalací CO₂ do ovzduší. V první řadě je nutné podotknout, že exhalace CO₂ se liší u obou pohonů zejména místem vzniku. Zatímco hlavní část exhalací CO₂ vozidla se spalovacím motorem pochází přímo z místního spalování za provozu, tak místní exhalace CO₂ elektromobilu jsou nulové. Z globálního hlediska jsou exhalace CO₂ pro jízdu vozidla s elektrickým pohonem způsobeny zejména výrobou elektrické energie, vznikají tedy v místě této výroby. V praxi to znamená, že provoz vozidla s elektromotorem nepřispívá ke znečištění měst, tak jako je tomu u vozidla se spalovacím motorem. Je také nutné podotknout, že z globálního hlediska je srovnání exhalací CO₂ závislé zejména na energetickém mixu, tedy na čistotě výroby elektrické energie.

4.8.1 Vozidlo se spalovacím motorem

Pro stanovení množství vyprodukovaného CO₂ je využito výpočtů z kapitoly předchozí, kdy byly zjištěny hodnoty výroby elektrické energie pro elektrický pohon. Pro pohon spalovací je využito hodnot z kapitoly 2, kde je uvedena spotřeba benzínu na vzdálenost 100 km.

Nejprve je proveden výpočet emisí CO₂ pro vozidlo se spalovacím motorem. Pro účely tohoto výpočtu je třeba znát hodnotu vyprodukovaného CO₂ na jeden litr spáleného benzínu. Tato hodnota je přibližně 2,5 kg/l spotřebovaného benzínu a závisí tedy přímo na spotřebě vozidla se spalovacím motorem. Pro zjištění celkové produkce pro zvolené jízdní režimy je opět sestavena tabulka 46, kde je nutné zohlednit i nepřímé emise CO₂ způsobené výrobou, těžbou a přepravou, pro stanovení této hodnoty je opět využit index EROEI pro nárůst spotřebovaného zdroje.

Tabulka 46: Produkce CO₂ osobního automobilu pro pohyb ustálenou rychlostí

Rychlost	Spotřeba	Produkce CO ₂	Místní produkce CO ₂ na kilometr	EROEI	Spotřeba celková	Produkce CO ₂ celková
km/h	l/100km	kg/l	g/km	-	l/100km	g/km
50	2,6	2,5	65	8	2,9	73,1
80	3,9	2,5	97,5	8	4,4	109,7
90	4,5	2,5	112,5	8	5,1	126,6

4.8.2 Vozidlo s elektrickým motorem

Jak již bylo zmíněno, tak místní emise vozidla s elektrickým pohonem jsou samozřejmě nulové. Tato skutečnost je obrovskou výhodou elektrického pohonu z hlediska řešení problémů se znečištěným ovzduším ve velkých městech, ale jak je známo, tak jeho nepřímé emise způsobuje hlavně výroba elektrické energie. Emise CO₂ elektrického pohonu jsou tedy opět závislé na energetickém mixu, zejména na podílu vyrobené energie "čisté" a "špinavé". Pro určení energetického mixu je opět použito údajů z [11]. Tabulka 47 udává hodnoty průměrných emisí CO₂ [10] do ovzduší pro jednotlivé typy elektráren.

Tabulka 47: Současný podíl elektráren na výrobě elektrické energie v ČR a přibližné hodnoty produkce CO₂ pro jednotlivé typy.

Typ elektrárny	Podíl na výrobě	Produkce CO ₂
	%	<i>g/kWh</i>
Uhlí	59	950
Jaderná	34	12
Vodní	3,4	15
Plyn	2,7	400
Větrná	0,4	18
Fotovoltaika	0,7	90

Jak je možné vidět nejvíce emisí CO₂ do ovzduší produkují uhelné elektrárny a elektrárny plynové. Z obnovitelných zdrojů je zde poněkud nečekaně vysoká hodnota pro FVE. Takto vysoká hodnota je způsobena poměrně malým množstvím vyrobené energie v poměru k ploše a životnosti elektrárny a také náročnou technologií výroby a likvidace fotovoltaických článků[10].

Pro vyčíslení množství emisí CO₂ do ovzduší způsobených jízdou vozidla s elektromotorem je nutné sestavit tabulku výroby energie pro každý jízdní režim. Pro ukázkou je uvedena tabulka 48 pro rychlost 90 km/h, tedy potřebná energii z elektrárny 18,8 kWh pro ujetí vzdálenosti 100 km.

Tabulka 48: Produkce CO₂ současného energetického mixu při výrobě energie pro ujetí vzdálenosti 1 km uvažovaným elektromobilem

Potřebná energie	Typ elektrárny	Podíl na výrobě	Vyrobena	Produkce CO ₂ elektrárny	Produkce CO ₂ na 1 kilometr jízdy
kWh		%	kWh	g/kWh	g/km
18,8	Uhlí	59,1	11,1	950,0	105,5
	Jaderná	33,8	6,3	12,0	0,8
	Vodní	3,5	0,6	15,0	0,1
	Plyn	2,7	0,5	400,0	2,2
	Větrná	0,4	0,1	18,0	0,0
	Fotovoltaika	0,7	0,1	90,0	0,1
Celkem			18,8		109

Výsledky výpočtů pro všechny jízdní režimy jsou uvedeny v tabulce 49.

Tabulka 49: Produkce CO₂ způsobená jízdou elektromobilu ustálenou rychlostí na 100 km

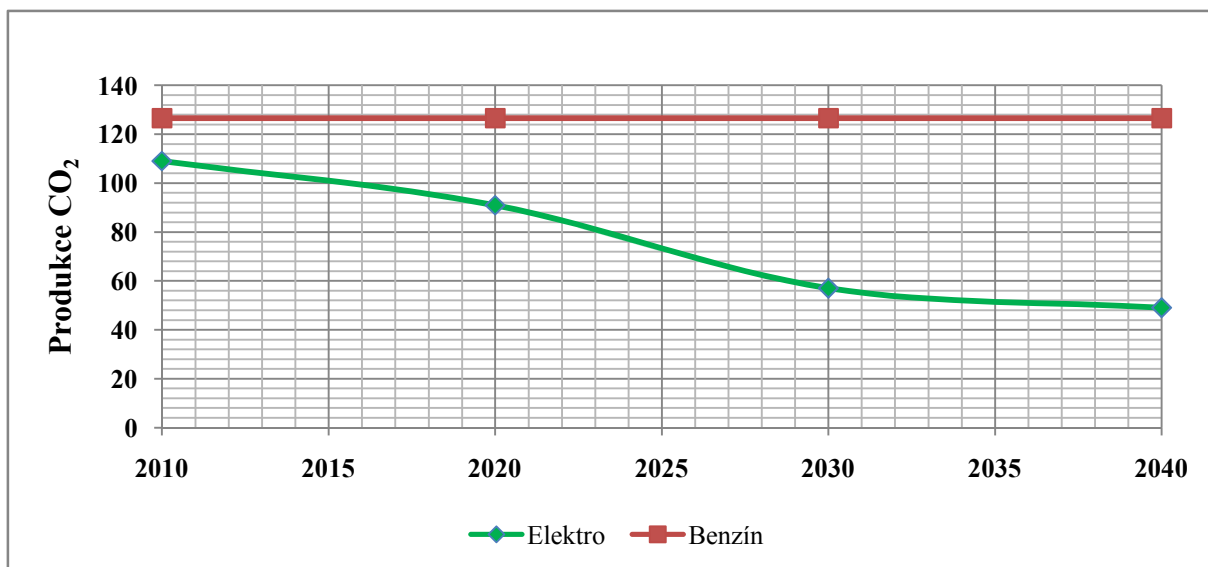
Rychlost	Potřebná energie	Produkce CO ₂
km/h	kWh	g/km
50	11	64
80	16,4	95
90	18,8	109

Z tabulek 46 a 49 vyplývá, že při současném energetickém mixu jsou emise CO₂ provozu vozidla s elektromotorem o něco nižší, než emise vozidla se spalovacím motorem. Jak se však bude situace vyvíjet v budoucnu, je přibliženo opět na základě odhadu [11] zobrazeném v grafu 19 a v tabulce 50.

Pokud budou do výpočtové tabulky 48 dosazeny hodnoty podle odhadu vývoje energetického mixu, pak vznikne tabulka 50, ve které jsou uvedeny jednotlivé emisní hodnoty CO₂ pro provoz elektromobilu. Tyto hodnoty jsou samozřejmě přibližné a platí za předpokladu, že nejsou brány v úvahu změny účinností jednotlivých elektráren a dalších komponentů, které jsou součástí řetězce toku energie. Stejně tak při výpočtu není zohledněna možnost změn v produkci CO₂ vztažené na jednotku energie pro jednotlivé elektrárny. V grafu 19 je zobrazeno porovnání vývoje emisí CO₂ při dodržení výše stanovených předpokladů, hodnoty v grafu jsou uvedeny pro jízdu konstantní rychlostí 90 km/h na vzdálenost 100 km.

Tabulka 50: Vývoj produkce CO₂ jízdou uvažovaného elektromobilu

	2014	2020	2030	2040
Rychlost	Produkce CO ₂	Produkce CO ₂	Produkce CO ₂	Produkce CO ₂
km/h	kWh	g/km	g/km	g/km
50	64	53	33	29
80	95	79	50	43
90	109	91	57	49



Graf 19: Vývoj produkce CO₂ jízdou uvažovaného elektromobilu

Je tedy zřejmé, že při dodržení výše zavedených předpokladů bude v budoucnu uhlíková stopa výroby elektrické energie, a tedy i provozu elektromobilu, výrazně klesat. S výše uvedeným složením energetického mixu v ČR pro rok 2040 by měla produkce CO₂ klesnout až pod polovinu současné hodnoty.

ZÁVĚR

Práce se zabývá energetickou, ekonomickou a environmentální problematikou provozu vozidel poháněných zážehovým spalovacím motorem a elektromotorem. Cílem práce je, co nejkompexněji porovnat oba tyto typy vozidel. Obě vozidla by měla být co možná nejkvivalentnější (výkon motoru, hmotnost, karoserie atd.), aby bylo možné provést srovnání. Pro dodržení tohoto předpokladu je v práci provedena teoretická přestavba vozidla se spalovacím motorem na vozidlo s motorem elektrickým. Porovnání obou typů vozidel je provedeno z následujících hledisek: Z pohledu celkové energetické náročnosti provozu, ekonomické náročnosti provozu pro koncového uživatele, z hlediska dojezdu a disponibility a v neposlední řadě z pohledu dopadu provozu obou vozidel na životní prostředí.

Pro dosažení správných výsledků bylo důležité zejména důsledné propočtení odporů působících proti směru jízdy vozidel a zohlednění všech ztrát, které se vyskytují na řetězci přenosu výkonu. Tyto dva základní parametry byly porovnány pro obě verze vozidla, kde jsou rozdíly dané zejména odlišnou hmotností porovnávaných verzí a samozřejmě celkovou rozdílností pohonů. Bylo zde zjištěno, že účinnosti přenosu točivého momentu se pro oba uvažované pohony diametrálně liší. Zatímco automobil je zatížen obrovskými ztrátami ve spalovacím motoru, tak elektromobil disponuje vysoce účinným synchronním motorem. Pro elektromobil však musí být uvažovány ještě ztráty při řízení elektromotoru a ztráty při nabíjení. Výsledná účinnost pohonu se zážehovým motorem je potom 25 % a účinnost pohonu elektrického 68 %. Po započítání ztrát výroby a přenosu elektrické energie pro vozidlo s elektromotorem je výsledná účinnost přenosu energie 22 %. V případě pro vozidlo s motorem spalovacím potom 23 %. Celkové účinnosti obou pohonů jsou tedy srovnatelné, s čímž také souvisí celková energetická náročnost, která je na základě propočtu účinností opět srovnatelná pro oba typy pohonů. Ovšem podle předpokládaného vývoje energetiky v ČR se bude tato situace měnit zejména tím, že se bude zvyšovat část elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů, kdežto benzín bude stále získáván ze zdrojů neobnovitelných.

Při porovnání ekonomických nároků na provoz vozidel bylo zjištěno, že vozidlo poháněné elektromotorem je opravdu výhodnější oproti automobilu zejména co se týče nákladů na spotřebovanou energii (palivo), avšak při zohlednění vysokých nákladů na pořízení, má tato investice poměrně dlouhou návratnost.

Srovnání obou pohonů z hlediska produkce CO₂ bylo provedeno opět na základě údajů o výrobě elektrické energie, tedy na složení energetického mixu ČR. Pro současnou výrobu elektrické energie bylo zjištěno, že celkové znečištění ovzduší vlivem provozu vozidla s elektrickým pohonem je pouze o málo menší, než znečištění vlivem provozu vozidla s motorem spalovacím. Tato skutečnost opět závisí na způsobu výroby elektrické energie, a proto s nárůstem výroby pomocí čistých zdrojů bude znečištění menší. Je zde nutné

zdůraznit, že i přes srovnatelnou míru znečištění jsou lokální exhalace CO₂ u vozidla s elektromotorem nulové, což znamená omezení znečištění zejména v místech vysoké koncentrace provozu osobních vozidel.

Porovnání pohonů bylo provedeno i z hlediska dojezdu, kde byl podle předpokladu výsledek jednoznačně ve prospěch vozidla se spalovacím motorem. Zde se však nabízí otázka, zda je pro uživatele dojezd vozidla se spalovacím motorem skutečně využitelný. Protože dle průzkumů je dojezd elektromobilu dostatečný pro naprostou většinu vykonaných cest v městských a příměstských oblastech.

Cílem práce bylo přinést odpovědi na otázky spojené s provozem vozidla s elektrickým pohonem a to porovnáním hmotnosti, trakčních vlastností, spotřeby energie, nákladů na energii, celkových nákladů, dojezdu, primární spotřeby energie i produkce oxidu uhličitého dvou navzájem velmi příbuzných vozidel. Práce tedy odpověděla na všechny tyto otázky.

Tato práce prošetřuje provoz obou vozidel v takřka ideálních podmínkách, tedy při jízdě po rovině a za bezvětří. Stejně tak není v práci uvažována možnost rekuperace energie nebo nutnost použití elektrického topení v zimních měsících. Při skutečném provozu by tedy do spotřeby energie celkem významným podílem promlouvaly i tyto aspekty. Výsledky práce jsou tedy vhodné spíše k hrubšímu porovnání obou vozidel, než k modelování skutečného provozu. Zejména v této části je potenciál navázání dalšími pracemi na téma vozidel poháněných elektromotorem.

SEZNAM ZDROJŮ

Tištěné:

- [1] DOUDA, Pavel, Tomáš HEPTNER a Josef KOLÁŘ. *Pozemní dopravní prostředky*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2002, 154 s. ISBN 80-010-2441-5.
- [2] SVOBODA, Jiří. *Teorie dopravních prostředků: Vozidla silniční a terénní*. ČVUT, 2004.
- [3] CÍLEK, Václav, Martin KAŠÍK a Tomáš RULLER. *Nejistý plamen: průvodce ropným světem*. 2., dopl. a aktualiz. vyd. Praha: Dokořán, 2008, 239 s., [16] s. obr. příl. ISBN 978-80-7363- 218-2.
- [4] KAMEŠ, Josef, Martin KAŠÍK a Tomáš RULLER. *Alternativní pohon automobilů: průvodce ropným světem*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 231 s. ISBN 80-730-0127-6.

Elektronické:

- [5] Ročenka dopravy 2012. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenky.htm>
- [6] Perspektivy elektromobility. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/FCC/Perspektivy_elektromobility_II/Perspektivy_elektromobility_II_output/web/flipviewerxpress.html?pn=4
- [7] ČEZ: Kalkulace ceny energie. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/elektrina.html>
- [8] Hybrid.cz: Elektromobily, elektromotocykly, CNG, LPG. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz>
- [9] Škoda techweb. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://skoda.panda.cz>
- [10] NEJEDLÝ, Petr. Výroba elektřiny vs. emise. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/87497/Vyroba-elektriny-versus-emise-CO2-schizofrenie-a-brouseni-sekyry.html>
- [11] Aktualizace státní energetické koncepce: ASEK 2012. [online]. Praha, 2012 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: www.mpo.cz/assets/cz/2012/11/ASEK.pdf
- [12] ERoEI. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/ERoEI>
- [13] Technická data Škoda Felicia. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.vozyskoda.wz.cz/felicia/techdata.htm>

- [14] Elektromobily: Informace. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://elektromobil.vseznamu.cz>
- [15] Zytec automotive. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.zytecautomotive.co.uk>

SEZNAM ZKRATEK:

OZE - obnovitelné zdroje energie

VTE - větrná elektrárna

FVE - fotovoltaická elektrárna

VE - vodní elektrárna

JE - jaderná elektrárna

EROEI - index energetické návratnosti

ČR - Česká republika

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Uspořádání pohonu vozidla se spalovacím motorem.....	11
Obrázek 2: Schéma elektrického pohonu s elektromotory integrovanými v nábojích kol.....	12
Obrázek 3: Schéma elektrického pohonu využívajícího pro rozvod točivého momentu diferenciál (případně i převodovku)	13
Obrázek 4: Pohled z čela konektoru nabíjecího systému Chademo	15
Obrázek 5: Pohled z čela konektoru nabíjecího systému SAE J1772	16
Obrázek 6: Huštění pneumatik	24
Obrázek 7: Vozidlo jedoucí do/z kopce a složení tíhové síly tohoto vozidla.....	27
Obrázek 8: Řetězec účinností automobilu	47
Obrázek 9: Řetězec účinností elektromobilu	47
Obrázek 10: Řetězec průměrných účinností na rozvodné síti.....	54

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Momentová charakteristika spalovacího motoru	20
Graf 2: Trakční charakteristika automobilu	22
Graf 3: Průběh aerodynamického odporu	23
Graf 4: Valivý odpor	26
Graf 5: Zobrazení závislosti jízdních odporů na rychlosti	28
Graf 6: Průběhy zrychlení vozidla	29
Graf 7: Zrychlení vozidla (závislost rychlosti na čase)	30
Graf 8: Měrná spotřeba spalovacího motoru	30
Graf 9: Momentová charakteristika	37
Graf 10: Trakční charakteristika elektromobilu	38
Graf 11: Jízdní odpory elektromobilu	39
Graf 12: Zrychlení elektromobilu	40
Graf 13: Závislost rychlosti na čase při akceleraci elektromobilu	41
Graf 14: Porovnání momentových charakteristik	43
Graf 15: Porovnání trakčních charakteristik	44
Graf 16: Porovnání jízdních odporů	45
Graf 17: Porovnání akcelerace	46
Graf 18: Vývoj energetického mixu v ČR	57
Graf 19: Vývoj produkce CO ₂ jízdou uvažovaného elektromobilu	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání různých způsobů dobíjení elektromobilů	16
Tabulka 2: Parametry uvažovaného vozidla se spalovacím motorem	19
Tabulka 3: Technické parametry převodovky	21
Tabulka 4: Hodnoty aerodynamického odporu	23
Tabulka 5: Vybrané typy vozidel a jim odpovídající hodnoty součinitele tvaru vozidla	24
Tabulka 6: Seznam vybraných povrchů a jim odpovídající měrné odpory valení	25
Tabulka 7: Hodnoty valivého odporu	25
Tabulka 8: Hodnoty odporů působících proti jízdě vozidla	27
Tabulka 9: Tabulka vypočtených hodnot zrychlení pro 1. a 2. převodový stupeň	29
Tabulka 10: Měrná spotřeba odpovídající zvoleným jízdním režimům	31
Tabulka 11: Trakční práce vykonaná na dráze 100 km	31
Tabulka 12: Parametry benzínu Natural 95	31
Tabulka 13: Spotřeba paliva	32
Tabulka 14: Validace valivého odporu	33
Tabulka 15: Seznam komponentů montovaných a demontovaných	34
Tabulka 16: Hmotnostní bilance přestavby	34
Tabulka 17: Snížení užitečného zatížení vozidla	35
Tabulka 18: Parametry akumulátorové baterie	35
Tabulka 19: Parametry elektromotoru	36
Tabulka 20: Parametry týkající se přenosu točivého momentu	37
Tabulka 21: Jízdní odpory elektromobilu	38
Tabulka 22: Hodnoty zrychlení elektromobilu	39
Tabulka 23: Závislost rychlosti na čase při akceleraci elektromobilu	40
Tabulka 24: Potřebná energie dodaná z akumulátorové baterie	41
Tabulka 25: Energie potřebná pro jízdu elektromobilu (spotřebovaná při nabíjení)	42
Tabulka 26: Porovnání jízdních odporů	45
Tabulka 27: Ověření vypočtených účinností řetězce automobilu	47
Tabulka 28: Ověření vypočtených účinností elektromobilu	48
Tabulka 29: Náklady na údržbu automobilu	49
Tabulka 30: Náklady na údržbu elektromobilu	49
Tabulka 31: Porovnání nákladů na údržbu	49
Tabulka 32: Náklady na energii pro provoz elektromobilu	50
Tabulka 33: Náklady na palivo pro provoz automobilu	50

Tabulka 34: Srovnání celkových nákladů na provoz.....	51
Tabulka 35: Srovnání dojezdu obou uvažovaných verzí vozidla	51
Tabulka 36: Nabíjení elektromobilu	52
Tabulka 37: Čerpání paliva.....	52
Tabulka 38: Disponibilita vozidel.....	52
Tabulka 39: Celková energetická náročnost provozu automobilu.....	53
Tabulka 40: Účinnost řetězce přenosu energie z ropného ložiska až na vozovku.....	53
Tabulka 41: Současné složení energetického mixu ČR.....	55
Tabulka 42: Požadavek na množství energie vyrobené v elektrárně potřebné pro provoz elektromobilu	55
Tabulka 43: Výpočet celkové spotřebované energie z primárních zdrojů pro provoz elektromobilu při konstantní rychlosti 90 km/h a ujeté vzdálenosti 100 km.....	56
Tabulka 44: Účinnost řetězce přenosu elektrické energie	56
Tabulka 45: Vývoj energetického mixu v ČR.	57
Tabulka 46: Produkce CO ₂ osobního automobilu pro pohyb ustálenou rychlostí.....	58
Tabulka 47: Současný podíl elektráren na výrobě elektrické energie v ČR a přibližné hodnoty produkce CO ₂ pro jednotlivé typy.	59
Tabulka 48: Produkce CO ₂ současného energetického mixu při výrobě energie pro ujetí vzdálenosti 1 km uvažovaným elektromobilem	60
Tabulka 49: Produkce CO ₂ způsobená jízdou elektromobilu ustálenou rychlostí na 100 km..	60
Tabulka 50: Vývoj produkce CO ₂ jízdou uvažovaného elektromobilu	61