



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Ekonomická efektivnost plug-in hybridního pohonu automobilu

Economic efficiency of plug-in hybrid car drive

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Josef Morkus CSc.

Miloš Studničný

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a využil k tomu pouze literaturu uvedenou v seznamu zdrojů na konci práce.

Jsem obeznámen se zákonem č.121/2000 Sb. , o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zmíněného zákona.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Josefu Morkusovi CSc., za cenné připomínky a rady ohledně různých úskalí, která mohou provázet měření a vyhodnocování podobných prací. Dále mu děkuji za jeho podporu a vedení při práci na tomto projektu.

Dále děkuji Centru vozidel udržitelné mobility Josefa Božka v Roztokách, z jehož inventáře mi bylo zapůjčeno potřebné měřicí zařízení pro záznam jízdy automobilu v reálném provozu.

V neposlední řadě děkuji všem, kteří mi umožňují studovat a podporují mě na cestě studiem i osobním životem.

Abstrakt

Práce se ve svém úvodu zabývá popisem zkoumané problematiky a částečně nastíní i příčiny použití plug-in hybridního pohonu v automobilech. Dále se zabývá vhodným provozem pro vozy s tímto systémem pohonu a navrhuje hodnotící trasu. V další části je rozvedeno, jakým způsobem byla během výzkumu hodnocena energetická náročnost trasy a jak byly vytvářeny profily popisující trať. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky měření a je diskutována výhodnost plug-in hybridního vozu pro provoz zastoupený typizovanou trasou.

Klíčová slova

Plug-in hybrid, referenční trasa, výškový profil, rychlostní profil, odpor valení, odpor stoupání, odpor setrvačnosti, odpor vzduchu, odpor přivěsu, energetická náročnost, spotřeba energie, spotřeba paliva, spotřeba přídatných pohonů, ekonomická efektivita

Abstract

In the beginning of this thesis, there is a description of the research. Partly there is a reason for using plug-in hybrid car drive. Next, there is description of appropriate traffic for cars with this drive and draft of evaluating route. Next part describes how the energy consumption was rated and how the route profiles was made. In the end of this thesis, there are evaluated the results and there are discussed advantages of plug-in hybrid car drive for traffic represented by standardized route.

Key words

Plug-in hybrid, the reference route, elevation profile, speed profile, rolling resistance, gradient resistance, inertia resistance, aerodynamic resistance, the resistance of trailer, power consumption, energy consumption, fuel consumption, consumption of auxiliary drives, economic efficiency

Obsah

1. Úvod	8 -
1.1. Elektrifikace automobilů.....	8 -
2. Plug-in hybridní vozy	11 -
3. Podmínky měření.....	13 -
3.1. Referenční trasa.....	13 -
3.2. Automobil pro záznam jízdy.....	17 -
3.3. Porovnávané vozy	18 -
3.4. Přístrojové vybavení.....	19 -
4. Jízdní odpory vozidla [2], [4]	21 -
4.1. Odpor valení.....	21 -
4.2. Odpor stoupání	23 -
4.3. Odpor setrvačnosti.....	23 -
4.4. Odpor vzduchu	25 -
4.5. Odpor přívěsu	26 -
5. Spotřeba energie	27 -
5.1. Jízda se záznamem dat	28 -
5.2. Energetická náročnost trasy GTI.....	30 -
5.3. Energetická bilance spotřebičů	31 -
5.4. Energetická náročnost trasy GTE.....	34 -
5.5. Jízda do Jesenice	36 -
6. Analýza návratnosti investice	38 -
6.1. Provoz běžného GTI.....	38 -
6.2. Úspory bez možnosti dobítí.....	39 -
6.3. Úspory s možností dobítí.....	39 -
6.4. Denní úspory a návratnost investice	40 -
7. Závěr	41 -
8. Zdroje.....	42 -
9. Přehled použitých veličin	44 -
10. Seznam obrázků.....	47 -
11. Přílohy.....	48 -

1. Úvod

Základní motivací této práce je neustále se rozšiřující nabídka vozů s takzvaným plug-in hybridním systémem pohonu. Ten nabízí možnost provozovat automobil buď na energii z baterií, které je možné dobíjet z běžného rozvodu elektřiny, nebo v případě kdy jsou již baterie vybité, se spustí spalovací motor, který poskytne energii pro pokračování v jízdě. Výrobci automobilů se rozhodli nabízet výrobky s tímto systémem pohonu, aby zahnali obavy spotřebitelů z omezeného dojezdu čistě elektrických modelů svých vozů.

Výsledkem kompromisu mezi ekologickými elektrickými vozy s omezeným dojezdem, po jehož dosažení je třeba vůz několik hodin nabíjet, a vozy s konvenčními spalovacími motory, které je možné po vyčerpání veškerého paliva během několika minut opět provozovat stovky kilometrů bez nutnosti doplňování paliva, jsou právě plug-in hybridní vozy, které nabízí výhody obou variant.

Hlavním cílem této práce je zhodnocení návratnosti investice do tohoto systému pohonu automobilu, při takovém druhu provozu, kdy je vůz využíván převážně pro denní dopravu uživatele do zaměstnání a zpět domů. K tomuto účelu byla navržena referenční trasa, po které by bylo vozidlo převážně užíváno, a která by dobře vystihovala typickou situaci, kdy obyvatelé předměstí velkých měst dojíždí do centra za prací. Po vytipování vhodné trasy bylo následně provedeno několik průjezdů zvolenou trasou se záznamem dat z jízdy tak, aby byly získány dostatečné informace a data pro výpočty potřebného množství energie pro jízdu vozidlem, které jsou následně využity pro výpočet finanční úspory provozovatele vozidla.

1.1. Elektrifikace automobilů

V posledních letech hraje významnou roli v technickém pokroku ekologie a energetická hospodárnost. Jejich vliv je patrný prakticky ve všech průmyslových odvětvích i v prostém lidském životě. Pozorovat je můžeme od základní těžby surovin přes jejich zpracování, až po úsporu lidstva v běžném životě a provozu domácností v konečných důsledcích.

Ano, ekologie je bezpochyby tématem, které v současné době doslova hýbe světem a bylo by chybou brát jej na lehkou váhu. Zamyslíme-li se, jakým způsobem se

naše planeta změnila od poslední průmyslové revoluce, která dala vzniknout vynálezům jako je například elektrina nebo spalovací motor, nemůže naší pozornosti uniknout, že nároky lidstva na pohodlí postupem času prudce stoupají, stejně jako roste naše spotřeba surovin a míra znečištění Země. Postupné zvyšování komfortu a blahobytu lidstva vede také k výraznému nárůstu populace. Tím se pomyslný kruh uzavírá - lidstvo se rozrůstá a nároky jednotlivců rostou také.

V několika posledních desetiletích si již dobře uvědomujeme, že naše zdroje surovin nejsou nevyčerpatelné. Jejich zásoby klesají a cena naopak roste – to vede k tomu, že je potřeba s těmito zdroji mnohem lépe hospodařit, případně se snažit stávající zdroje nahradit novými, nejlépe obnovitelnými zdroji.

Budeme-li se nyní zabývat otázkou, kde je reálně možné co nejdříve a také co nejnákladněji ušetřit nároky na energii, bude doprava na jedné z předních pozic pomyslného žebříčku. Je to dáno tím, že s jejím prudkým rozmachem zasáhla do životů většiny populace tak výrazně, že si dnes už ani neumíme představit svět, kde by nebylo možné prakticky kdykoliv vyrazit na cestu motorizovaným dopravním prostředkem, velmi často samostatně v osobním automobilu.

Individuální automobilová doprava je uznávána mnoha vědeckými výzkumy a studii, jako jedna z nejvíce se podílejících složek na čerpání zásob fosilních paliv a také na znečišťování životního prostředí. Proto je potřeba se této problematice intenzivně věnovat a hledat nové technologie, které umožní užívat si komfortu, na který jsme již tak výrazně navyklí, ovšem s efektivnějším využíváním energie.

Jednou z těchto alternativních technologií je právě pohon automobilů na elektřinu dodávanou z baterií, které si auto vozí s sebou. Tímto způsobem pak vůz po sobě nezanechává prakticky žádné negativní vlivy na prostředí, kde se pohybuje, oproti standardním vozům s konvenčním spalovacím motorem, které do ovzduší kolem sebe za provozu vypouští spaliny ze spalovacího procesu v motoru a často tak přispívají k rozvoji smogové situace ve velkých městech. Postavení spalovacího motoru je ještě o to horší, že za provozu pracuje pouze výjimečně v ideálních podmínkách, s ideálním zatížením.

Oproti tomu se elektrina pro elektromobily vyrábí většinou ve velkých elektrárnách, které jsou navrženy tak, aby pracovaly stacionárně, v ideálních

podmínkách a dokázaly tak získat co nejvíce energie z primárních zdrojů, ať už jsou to elektrárny jaderné nebo spalující fosilní paliva. Obě tyto skupiny jsou pro Českou republiku velmi významné, neboť se podílí na výrobě téměř 90% veškeré vyrobené elektřiny u nás. Konkrétně 33,13% pro jaderné a 55,10% pro fosilní elektrárny. [1]

2. Plug-in hybridní vozy

Pojmem hybridní automobil rozumíme takový vůz, který má alespoň dva zásobníky energie a k nim příslušné spotřebiče, které umožňují čerpat energii ze zásobníku, aby ji přeměnily na trakční práci. Zpravidla jeden z těchto zásobníků je dobíjitelný za jízdy. V praxi se většinou setkáváme s kombinací zážehového motoru doplněného elektromotorem pro pohon vozu. Využití elektromotoru pro pohon vozidla přináší navíc tu výhodu, že kromě možnosti pohánět vůz ve chvílích, kdy je to výhodné, umožňuje také takzvané rekuperační brzdění. To znamená, že využívá instalovaný elektromotor v režimu generátoru, ke zpomalení pohybu vozidla. Tím elektromotor vytváří elektrickou energii, kterou je možné následně opět použít pro pohon. Tímto způsobem je možné využít energii, která se u běžných vozů zmaří v teplo odvedené brzdami do okolí.

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, hlavním problémem, který odrazuje spotřebitele od nákupu čistě elektrických automobilů, je jejich omezený dojezd a následné několikahodinové nabíjení baterií, kdy vůz musí zůstat zaparkovaný u zdroje elektřiny. Přestože dnešní elektromobily už běžně dosahují dojezdů okolo 150 km, což většině populace pro denní poježdění bohatě dostačuje, je právě tento omezený dojezd hlavním důvodem, proč lidé často odmítají čistě elektrické automobily a volí raději některou z hybridních variant, kdy mají stále v záloze jim dobře známý spalovací motor, který v případě nutnosti dovolí pokračovat v jízdě i na delší vzdálenosti bez nutnosti dlouhého čerpání energie ze zásuvky.

Právě takové obavy daly vzniknout hybridním vozům s možností dobíjení baterií z elektrické sítě, dnes známé pod slovním spojením „Plug-in hybrid“. Tento typ vozu v sobě kombinuje elektromobil s konvenčním automobilem se spalovacím motorem. V současnosti takové vozy dosahují dojezdů až 50 km v čistě elektrickém módu, což je výrazně nižší hodnota, než v případě čistého elektromobilu. Výhodou tohoto řešení však je, že vůz má na palubě kromě baterií také klasickou palivovou nádrž na benzín, která mu po vyčerpání energie z baterie umožní pokračovat v jízdě se spalovacím motorem. Toto řešení je tedy výhodné, pokud nechcete nebo nemůžete vlastnit více automobilů, abyste je mohli střídat dle potřeb. Plug-in hybridní vůz nabízí svému provozovateli možnost ušetřit náklady na pohonné hmoty při denním dojíždění do zaměstnání. Na druhé straně pro něj ale také není žádný problém, po pracovním týdnu vyrazit na

víkend na chalupu, nebo na delší vyjížďku například za vzdálenými příbuznými. Bez zábrán se lze s takovým vozidlem vydat třeba i na dovolenou k moři, protože při vybitých bateriích se dá provozovat jako běžný automobil se spalovacím motorem. Ovšem na takto dlouhé cestě již tento typ pohonu nepřináší výhody, jako může přinést ve městě. Hlavním pozitivem je zde poté především to, že Vám stále stačí pouze jeden automobil, který obsáhne všechny Vaše potřeby. Nicméně kvůli rozměrným a hmotným bateriím, potřebným řídicím jednotkám, složitější převodovce a také elektromotoru, je hmotnost takového vozu zhruba o 200 kg vyšší než v případě standardní verze automobilu se zážehovým motorem, což se při delších cestách projeví zvýšenou spotřebou benzínu a elektromotor se při dálničních přesunech využije nanejvýše při pojíždění v koloně.

3. Podmínky měření

V první fázi tohoto výzkumu bylo nutné rozhodnout, v jakých podmínkách by mělo být provedeno porovnání různých pohonných systémů vozidel. Po dohodě s vedoucím práce, bylo dohodnuto, že nejlepší vypovídající hodnotu bude mít takový provoz plug-in hybridního vozidla, kdy jeho uživatel bude plně využívat výhod takového pohonu ke své vlastní dopravě do zaměstnání a to tak, že většinu trasy pojede v hustém městském provozu, ve kterém jsou běžné spalovací motory poměrně málo účinné. Takový režim vozu umožňuje, aby bylo denně dosaženo nájezdu okolo 40 km, což by měl porovnávaný vůz Golf GTE, dle údajů výrobce zvládat v plně elektrickém režimu.

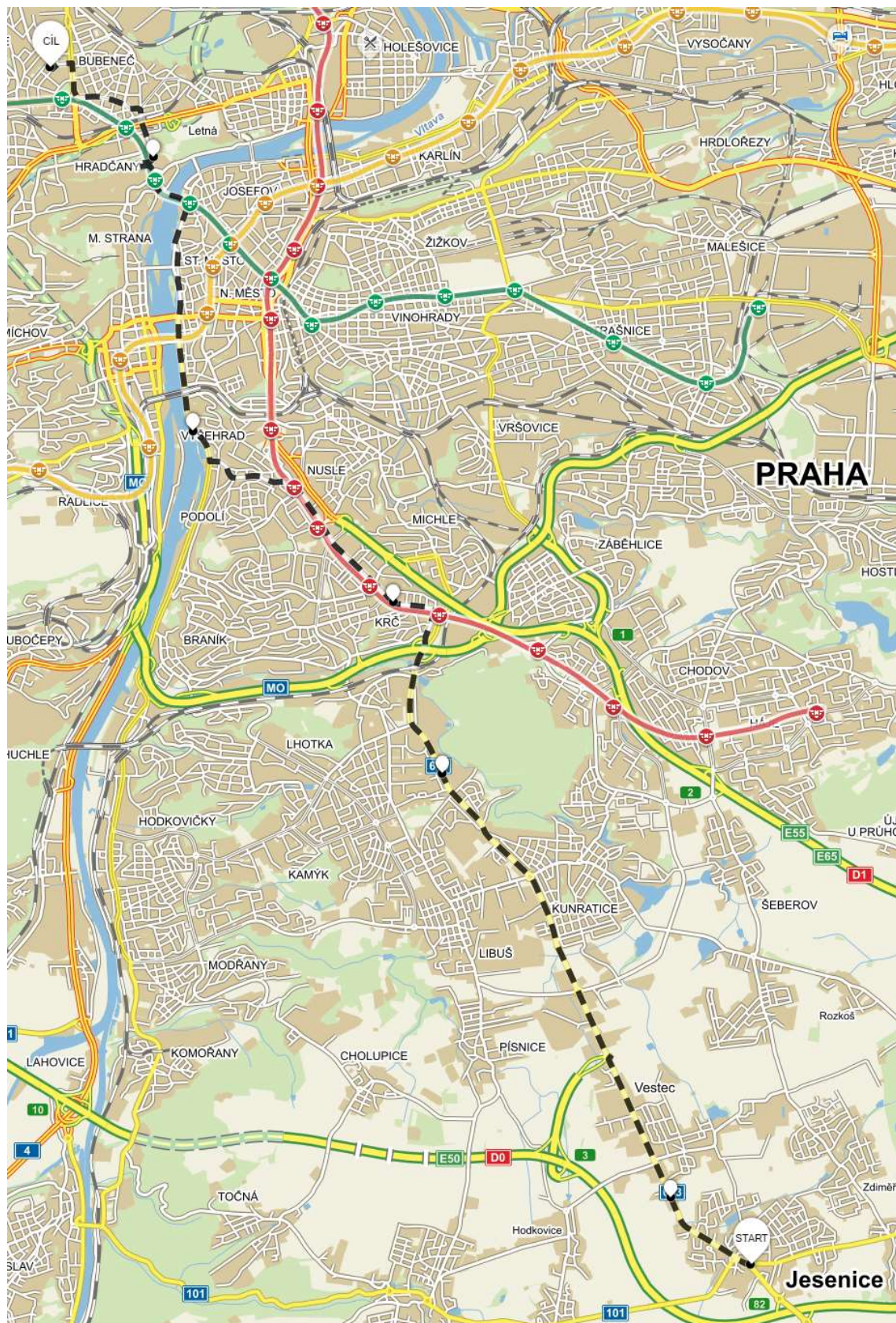
Samotné měření poté probíhalo v listopadu 2016, konkrétně ve 46. kalendářním týdnu roku, kdy se venkovní teplota pohybovala okolo 3°C.

3.1. Referenční trasa

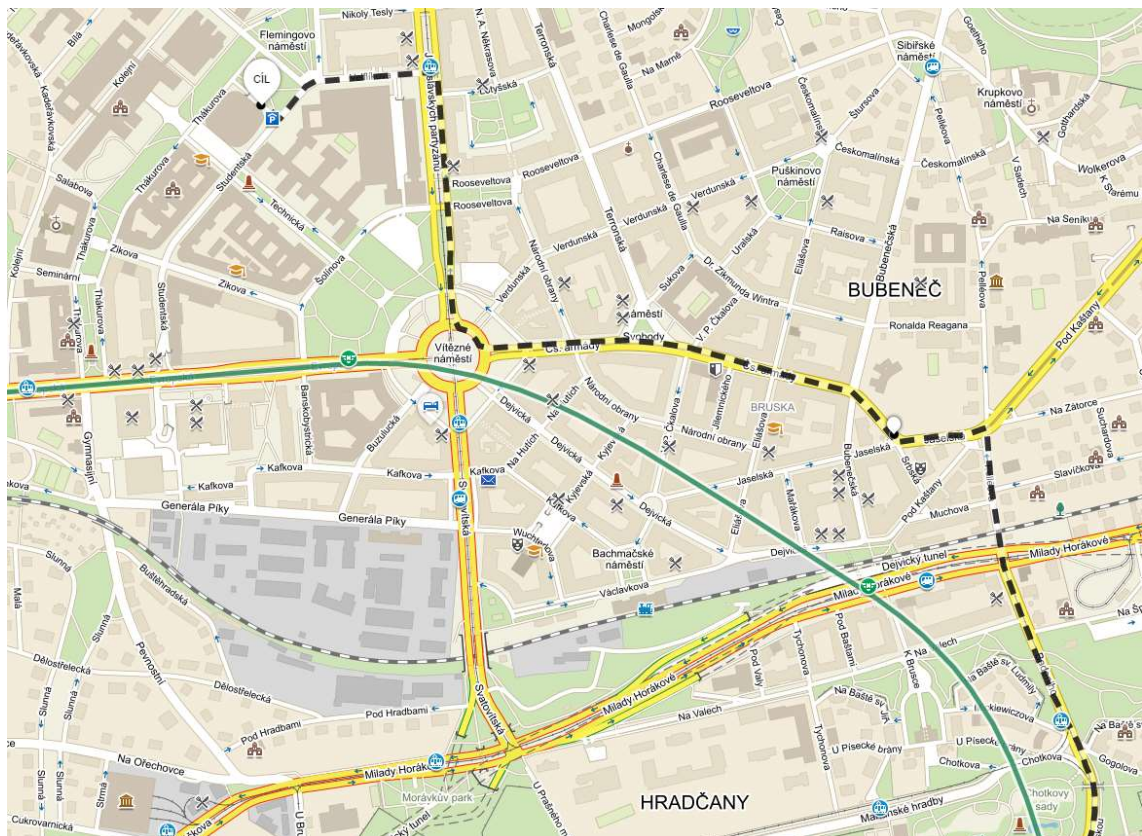
Pro porovnání byla vybrána referenční trasa, která odpovídá základním požadavkům výzkumu. Zvolená trasa uvažuje tu variantu, že provozovatel vozu bude bydlet na okraji Prahy, konkrétně v Jesenici u Prahy a bude denně dojíždět do zaměstnání do Dejvic, kde bude parkovat pod budovou Národní technické knihovny. Při jízdě do zaměstnání tak vůz projede centrem města v dopravní špičce a obdobná situace ho čeká také na cestě zpět. Celkový přehled trasy je uveden na další straně na obrázku číslo 1.

Na zvoleném úseku tak vůz denně ujede 20,1 km směrem do centra a při zpáteční cestě urazí dalších 21,2 km. Tento rozdíl je dán vlivem houstnoucího provozu v odpoledních hodinách, kdy je ulice Jugoslávských partyzánů ve směru od Roztok k Vítěznému náměstí téměř úplně zablokovaná a kolona zde jen pomalu popojíždí ke kruhovému objezdu. Zde je výhodné vyhnout se tomuto 400 metrovému ucpanému úseku úplně tak, že se z parkoviště Národní technické knihovny vydáme Studentskou ulicí do ulice Zikovy, odtud dále ulicí Thákurovou, kterou pokračujeme až na její konec, kde odbočíme doleva do Evropské ulice a již snadno se dostaneme ke kruhovému objezdu na Vítězném náměstí. Tento rozdíl je zvýrazněn v detailním obrázku č. 2 pro směr do Dejvic a na obrázku č. 3 pro směr do Jesenice.

Obrázek 1 – Celkový přehled trasy [3]



Obrázek 2 – Detail cesty do Dejvic [3]



Obrázek 3 – Detail cesty do Jesenice [3]



Pro další zpracování bylo nutné získat výškový profil trasy, aby bylo možné správně rozdělit trasu na úseky s konstantním sklonem vozovky. Tento výškový profil byl získán z mapových podkladů serveru www.mapy.cz. Poté byla trasa rozdělena tak, aby byly odděleny úseky s různým sklonem vozovky a navíc byly přidány dělicí body do míst, kde bylo předem možné předpokládat výraznější změnu rychlosti vozidla či jeho případné úplné zastavení. Takovými body se ve většině případů staly semaforey upravující provoz na pozemních komunikacích. Z tohoto rozdělení vyšlo celkem 100 úseků, přičemž 51 jich přísluší cestě do Dejvic a ze zbylých 49 úseků se skládá cesta zpět do Jesenice. Na obrázku číslo 4 je pro ilustraci uveden výškový profil trasy z Jesenice do Dejvic. Celý seznam úseků, na které byly obě části trasy rozděleny, společně s nadmořskými výškami dělicích bodů, je připojen jako příloha na konci této práce.

Obrázek 4 – Výškový profil trasy



3.2. Automobil pro záznam jízdy

V prvních úvahách o možnostech vyhodnocení energetické náročnosti trasy bylo zamýšleno jako ideální scénář zapůjčení plug-in hybridního vozu Volkswagen Golf GTE, který byl zvolen jako referenční zástupce plug-in hybridních automobilů, protože je možné tento vůz zakoupit ve 3 různých provedeních pohonného řetězce. Prodává se jako standardní vůz se spalovacím motorem, nebo jako čistě elektrický vůz i jako kombinace obojího v podobě plug-in hybridní verze. Bohužel po bližším prozkoumání nabídek trhu na zapůjčení tohoto vozu muselo být od této varianty upuštěno, protože nebyl nalezen žádný vhodný pronajímatel takového vozidla. Většina nalezených půjčoven nabízela jako nejkratší možnost zapůjčení vozidla jeden měsíc, čemuž také odpovídala cena takového pronájmu.

Po dohodě s vedoucím práce bylo nakonec rozhodnuto, že pro průjezd trasou bude použito nějaké vozidlo, blízké svým charakterem uvažovanému VW Golf. Ze všech možností, které připadaly v úvahu, byla nakonec vybrána jako náhrada Škoda Fabia 3. generace se zážehovým motorem 1.2 TSI a výkonem 66 kW. Tento vůz je celkově lehčí než uvažovaný Golf, zároveň má ale také nižší výkon, takže se tyto dva vlivy na dynamiku jízdy zároveň kompenzují. Na tomto místě je také důležité poznamenat, že při hustém městském provozu, ve kterém bylo následné měření uskutečněno, nejsou výkonové vlastnosti vozidla příliš důležité, protože celková dynamika jízdy je dána především okolním provozem, který při předvídané jízdě stejně neumožňuje výrazné rozdíly ve zrychlení a brzdění vozidla.

Obrázek 5 – Škoda Fabia 3. generace [10]



3.3. Porovnávané vozy

Aby bylo možné porovnat vlastnosti automobilu Volkswagen Golf GTE s odpovídajícím konkurentem, byla jako alternativa plug-in hybridní verze Golfu zvolena varianta stejného vozu, ovšem se zážehovým motorem. Pro co nejbližší přiblížení bylo potřeba zvolit takovou variantu, která bude svoji výbavou přibližně odpovídat výbavě verze GTE. Jako nejbližší srovnatelná varianta, byl vybrán Golf GTI 2.0 TSI bluemotion, s výkonem 169 kW a šestistupňovou převodovkou DSG. Cena tohoto modelu je 741 900 Kč [5], což je o téměř 270 000 Kč méně, než plug-in hybridní verze VW Golf [6].

Obrázek 6 – Volkswagen Golf GTE [11]



Při porovnání nejdůležitějších parametrů těchto vozů dostáváme následující tabulku [7]:

Vůz	VW Golf GTE	VW Golf GTI
Cena	1 009 000 Kč	741 900 Kč
Nejvyšší výkon	150 kW	169 kW
Pohotovostní hmotnost	1599 kg	1351 kg
Kapacita trakční baterie	8,7 kWh	-
Čelní plocha S_x	1,98 m ²	
Koeficient odporu vzduchu c_x [8]	0,28	
Uvažované zatížení	150 kg	

3.4. Přístrojové vybavení

Pro budoucí výpočty bylo nutné, vytvořit vhodný obraz rychlostního profilu, který by správně reprezentoval průběh rychlosti vozidla v hustém provozu. Původní myšlenka vytvoření teoretického průběhu rychlosti průjezdu danou trasou, kde by hlavní omezení tvořily rychlostní limity dané legislativou, nebo stavebně-technické limity, například při průjezdu zatáčkou, byla při prvních zkušebních jízdách vyhodnocena jako velice nepřesná a proto bylo rozhodnuto o přímém měření a záznamu rychlosti přímo v reálném provozu.

K tomuto účelu bylo zapůjčeno měřící zařízení z Centra vozidel udržitelné mobility Josefa Božka v Roztokách. Toto zařízení využívá softwarové i hardwarové prvky od firmy National Instruments.

Hlavní součástí je převodník signálu NI USB-8473s, který se připojuje do diagnostického konektoru vozidla a zprostředkovává komunikaci mezi sběrnici CAN ve vozidle a osobním počítačem, jež zaznamenává jízdní data.

Software, který v reálném čase zobrazuje jízdní data na monitoru počítače a zároveň umožňuje jejich záznam, byl vytvořen pracovníky fakulty strojní ČVUT v Praze, a to v prostředí programu LabVIEW, také od firmy National Instruments. V tomto programu je možné zvolit, jakou frekvencí budou zaznamenávána jízdní data.

Pro účely této práce byla zvolena frekvence 1 Hz, takže veškerá zaznamenaná data měla časovou základnu signálu a každou sekundu byla zaznamenána okamžitá hodnota všech zaznamenávaných kanálů.

Pomocí tohoto zařízení bylo možné zaznamenat signály ze sběrnice CAN ve vozidle. Při použití výše zmíněného automobilu bylo možné získat celkem 38 signálových kanálů. Z těchto signálů bylo možné přečíst například průběhy teploty a tlaku nasávaného vzduchu, otáčky motoru, rychlost vozidla, polohu pedálu plynu, teplotu chladicí kapaliny, napětí palubní elektrické sítě, úroveň zatížení motoru, nebo třeba teplotu katalyzátoru. Nejdůležitějším kanálem pro pozdější výpočty byla rychlost vozidla, kdy její derivací byly získány hodnoty podélného zrychlení vozidla při jízdě, a naopak integrací byla získána ujetá vzdálenost, což bylo výhodné pro převod průběhu rychlosti z časové na dráhovou základnu signálu, na které byl již postaven výškový profil trati.

4. Jízdní odpory vozidla [2], [4]

Tato kapitola shrnuje, jaké odpory musí obecně překonávat všechna vozidla při svém provozu. Tyto odpory jsou rozhodující pro zhodnocení energetické náročnosti vozidla, protože vyjadřují všechny síly, které vozidlu brání ve volném pohybu a nutí jej tak vykonávat práci k překonání těchto působících sil. Pokud by vozidlo nedokázalo překonat součet těchto sil, nepohybovalo by se.

Ve vozidlové technice rozdělujeme odpor vozidla do pěti skupin. Jejich seznam uvádím zde:

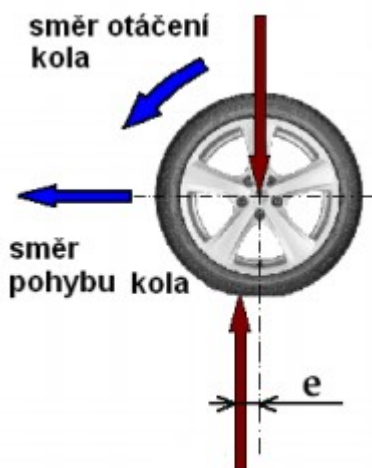
- Odpor valení
- Odpor stoupání
- Odpor setrvačnosti
- Odpor vzduchu
- Odpor přívěsu

Hodnota jednotlivých odporů závisí především na konstrukci automobilu a do jisté míry tak může být vhodnou konstrukcí vůz upraven tak, aby na něho během jízdy působily minimální odporové síly a vozidlo tak mohlo dosahovat nižší energetické náročnosti na pohyb.

4.1. Odpor valení

Tento odpor doprovází všechny stroje, které ke svému pohybu využívají kola v jakékoliv podobě a vždy působí proti směru pohybu. Je způsoben elastickými deformacemi ve styčné ploše kola s podložkou. Tyto deformace způsobují malé posunutí působišť sil mezi kolem a podložkou ve směru pohybu kola, lepší představu nabídne obrázek číslo 7 na další straně.

Obrázek 7 – Posun působíště sil na kolo [4]



Vzdálenost, o kterou se toto působíště posouvá, od ideálního místa dotyku se nazývá rameno valivého odporu a značí se e . Součinitel odporu valení značený f , je poté vyjádřen vztahem (4.1), kde r_d značí dynamický poloměr kola.

$$f = \frac{e}{r_d} \quad (4.1)$$

Při uvažování odvalování pneumatiky po asfaltu jsou z praxe uváděny hodnoty součinitele odporu valení v rozmezí $f = 0,01$ až $0,02$, v závislosti na kvalitě povrchu vozovky, typu a kvalitě pneumatiky a v neposlední řadě také huštění pneumatiky. Pro číselné vyjádření odporu valení pro tuto práci jsem uvažoval hodnotu $f = 0,015$, tedy střední hodnotu, mezi udávanými tabulkovými hodnotami.

Hodnota odporu valení se vypočítá jako součin zatížení pneumatiky a součinitele odporu valení, jak uvádí vzorec (4.2).

$$O_{fk} = f \cdot Z_k \quad (4.2)$$

V případě aplikace na osobní automobil, který má všechna čtyři kola stejná a správně nahuštěná, můžeme předpokládat také stejnou hodnotu odporu valení, pro všechna kola. Proto nemusíme počítat valivý odpor pro každé kolo zvlášť, ale lze výpočet odporu na jednotlivých kolech zjednodušit jako jednotný výpočet pro celé vozidlo, kde nahradíme zatížení pneumatiky tíhovou silou celého vozidla, jak uvádí vzorec (4.3).

$$O_f = f \cdot G \quad (4.3)$$

Tímto postupem nám vyjde jedna odporová síla působící na celé vozidlo, která je však ve skutečnosti realizována jednotlivými odpory valení na každém kole zvlášť. Tímto zjednodušením výpočtu se ale nedopouštíme žádné chyby, protože se celá tíha vozidla musí rozložit mezi všechna čtyři kola automobilu a ve výsledku bychom se oběma postupy dobrali stejné hodnoty. Rovnice (4.4) ukazuje, jak je vyjádřena tíhová síla vozidla, kde m značí hmotnost vozidla v kilogramech a g hodnotu tíhového zrychlení (uvažována hodnota $g=9,81 \text{ m/s}^2$). Další rovnice (4.5) značí, jak se změní odpor valení, pokud se vozidlo nebude pohybovat po vodorovné podložce, ale po nakloněné rovině s úhlem stoupání α .

$$G = m \cdot g \quad (4.4)$$

$$O_f = f \cdot G \cdot \cos(\alpha) \quad (4.5)$$

4.2. Odpor stoupání

Odpor stoupání není ve skutečnosti odporem v pravém slova smyslu, protože při jízdě z kopce, může svým působením urychlovat vozidlo. Jeho hodnota závisí pouze na tíze vozidla a na sklonu vozovky, po které se vozidlo pohybuje a může nabývat kladných i záporných hodnot. Číselně lze vyjádřit pomocí rovnice (4.6)

$$O_s = G \cdot \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

4.3. Odpor setrvačnosti

Odpor setrvačnosti působí proti každé síle, která se snaží změnit aktuální pohybový stav vozidla. Pokud se vozidlo snaží zrychlit, odpor setrvačnosti působí proti této změně a působí proti směru jízdy vozu. Když se snaží zpomalit, opět působí proti této změně, takže působí svoji silou ve směru jízdy vozidla.

Jeho celková hodnota se skládá ze dvou složek, jak ukazuje rovnice (4.7).

$$O_a = O_{ap} + O_{ar} \quad (4.7)$$

První složka vyjadřuje odpor zrychlení posuvných částí vozu, které jsou zastoupeny hmotností vozu m . Hodnota podélného zrychlení je zde značena a .

$$O_{ap} = m \cdot a \quad (4.8)$$

Druhá složka součtu v rovnici (4.7) vyjadřuje odpor zrychlení otáčejících se částí a je vyjádřena následující rovnicí.

$$O_{ar} = \frac{M_r}{r_d} \quad (4.9)$$

V uvedené rovnici veličina M_r vyjadřuje moment potřebný k urychlení rotačních částí vozidla, podle následujícího výrazu.

$$M_r = M_{rm} + M_{rp} + M_{rk} \quad (4.10)$$

Dle rovnice (4.10) se moment potřebný k urychlení rotačních částí vozidla skládá z:

- M_{rm} – momentu potřebného pro urychlení rotujících částí motoru
- M_{rp} – momentu potřebného pro urychlení převodovky
- M_{rk} – momentu potřebného pro urychlení kol

Všechny momenty vyskytující se v rovnici (4.10) již musí zohledňovat rozdílné otáčky jednotlivých částí pohonného řetězce a v tomto případě je jejich působišťe výpočtově vztaženo k otáčkám kol, jinak by nebylo možné jejich hodnotu sčítat.

Lepší představu, jakým způsobem se zohledňuje rozdílnost otáček pro vyjádření odporu zrychlení rotujících částí, nabízí rovnice (4.11), jejímiž vstupy jsou přímo momenty setrvačnosti jednotlivých částí pohonného řetězce a převody mezi nimi. Rovnice (4.11) vyjadřuje celkový odpor zrychlení, zahrnující posuvné i rotační části vozu.

$$O_a = \left[1 + \frac{(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum J_{Ki}}{m \cdot r_d^2} \right] \cdot m \cdot a = \vartheta \cdot m \cdot a \quad (4.11)$$

- kde: J_mmoment setrvačnosti rotujících částí motoru
 i_ccelkový převod mezi motorem a hnacími koly
 J_pmoment setrvačnosti rotujících částí převodovky
 i_rpřevod rozvodovky
 ηmechanická účinnost
 J_{Ki}moment setrvačnosti rotujících kol vozidla
 ϑsoučinitel vlivu rotačních částí

Pomocí této rovnice je možné naprosto přesně vyjádřit, jakou silou působí odpor zrychlení proti změně pohybového stavu vozidla. Bohužel veličiny, vstupující do tohoto výpočtu, dnes již nejsou běžnou součástí technické dokumentace, kterou zákazník obdrží při koupi a často je výrobce neposkytne ani na speciální žádost, kvůli možnému zneužití těchto hodnot konkurencí.

Ten samý osud provází i tuto práci, kdy se výrobce nebyl ochoten podělit o potřebné hodnoty a proto bylo nutné ve výpočtech volit nějakou hodnotu součinitele vlivu rotačních hmot, který by podle dostupných literárních zdrojů měl odpovídat běžnému osobnímu vozidlu. Po konzultaci s vedoucím práce bylo nakonec rozhodnuto, že součinitel vlivu rotačních hmot, bude uvažován jako konstanta o hodnotě 1,2. Tato hodnota je i podle zdroje [4] reálná pro nižší převodové stupně převodovky, což odpovídá použití vozidla v městském provozu.

4.4. Odpor vzduchu

Odpor vzduchu je síla, která směřuje proti relativnímu pohybu vozidla. Tento odpor je vyvolán prostředím, které vozidlo obklopuje a brání jeho pohybu. Hodnota tohoto odporu je vyjádřena rovnicí (4.12), kde ρ vyjadřuje měrnou hmotnost vzduchu, S_x čelní plochu vozidla, c_x součinitel aerodynamického odporu a v rychlost pohybu vozidla.

$$O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \quad (4.12)$$

Z předešlé rovnice je patrné, že aerodynamická složka odporu vozu se nejvíce uplatňuje při vyšších rychlostech vozidla, protože rychlost s rovnicí (4.12) vystupuje ve druhé mocnině.

4.5. Odpor přívěsu

Tento odpor je zde zmíněn pouze pro úplnost, aby byly zmíněny všechny obecně možné odpory vozidla. V našem případě se neuplatňuje, protože neuvažujeme vlečení přípojného vozíků při denní cestě do zaměstnání.

Na přívěs působí stejné odporové síly jako na samostatné vozidlo (odpor valení, stoupání, zrychlení, vzduchu, případně ještě dalšího přívěsu) a jejich číselné hodnoty je možné určit stejným postupem jako pro samostatné vozidlo. Výslednice těchto sil poté působí jako jedna síla reprezentující vliv vozíku na vlečné vozidlo.

Rozdíl je pouze v určení odporu vzduchu, protože ten se nevyjadřuje samostatně pro přípojný vozík, ale jako jeden celkový aerodynamický odpor celé soupravy, protože zde mohou vznikat velké rozdíly, podle tvaru karoserie vlečného vozidla. Navíc přípojný vozík nemůže být provozován samostatně, takže nelze vyjádřit hodnotu jeho aerodynamického odporu, pokud není zapojen do soupravy.

5. Spotřeba energie

Nejdůležitější částí této práce je vyčíslení celkové spotřeby energie pro projetí zvolené referenční trasy. Pro tuto část byl jako základní předpoklad zvolen fakt, že energie spotřebovaná pro jízdu odpovídá energii potřebné pro překonání všech jízdních odporů, navýšená ještě o spotřebu těch spotřebičů, které musí být za jízdy zapnuty, nebo jejich použití během jízdy patří mezi obecné zvyklosti.

Mezi takové spotřebiče, které jsou nezbytné pro jízdu, patří například řídicí jednotka motoru, protože bez ní by nebylo možné s vozidlem vůbec jet. Dalšími nezbytnými zařízeními ve vozidle jsou posilovač řízení a posilovač brzd, které jsou nepostradatelné pro bezpečné provozování vozidla na pozemních komunikacích. Nutný odběr energie si v České republice vyžadují také světla vozu, protože musí být za jízdy stále rozsvícená i v případě výborné viditelnosti.

Mezi spotřebiče, které sice nejsou nutné pro provozování vozu, ale obecně je zvykem mít je zapnuté, patří například klimatizace nebo topení, které mimochodem přispívají k aktivní bezpečnosti provozu také, protože udržují posádku vozu v komfortním prostředí a řidič se tak může plně soustředit na řízení vozidla.

Zásadní problém automobilů s možností plně elektrické jízdy je ten, že je nutné veškeré tyto doplňkové spotřebiče vozidla napájet z baterií, stejně jako motor, který vůz pohání. U vozidel se standardním spalovacím motorem jsme běžně navyklí, že po nastartování motoru jsou veškeré posilovače automaticky aktivovány. Ovšem to, že jsou to ve skutečnosti také spotřebiče zvyšující spotřebu vozu, si uvědomuje jen málokdo. Pohon posilovačů je zkrátka již zahrnut v celkové spotřebě vozu, kterou si přečteme na přístrojích ve vozidle. To, že energii pro pohon spotřebičů je nutné získat z paliva, si uvědomíme teprve tehdy, když zapneme klimatizaci a spotřeba se tak náhle zvýší i o jeden litr na 100 kilometrů.

Všechny zmíněné spotřebiče, které jsou běžně zapnuté při provozování vozu, budou v dalším textu označovány jako přídavné pohony.

To, že byl výrobce skoupý na sdílení technických dat jeho vozu, způsobilo problém, jak zohlednit spotřebu výše popsaných přídavných pohonů vozu. Po několika

nápadech, jak se co nejlépe přiblížit skutečným spotřebám těchto spotřebičů, byla nakonec zvolena jako nejlepší varianta ta, která předpokládá stejnou spotřebu těchto spotřebičů, ať jsou poháněny jakkoliv. Výsledkem této úvahy bylo, že například posilovač brzdného účinku vozidla, má stejnou spotřebu, ať je napájen z baterie vozu v případě elektromobilu, nebo když je poháněn přímo spalovacím motorem.

Pro získání správných spotřeb přidavných pohonů byla pro oba typy pohonu provedena bilance energií, ze které bylo možné konkrétně vyčíslit tyto hodnoty. Provedení bilance bude konkrétně znázorněno dále.

5.1. Jízda se záznamem dat

Jak již bylo zmíněno dříve, pro vytvoření rychlostního profilu průjezdu referenční trasou bylo využito standardního vozu Škoda Fabia 3. generace s využitím záznamu dat ze sběrnice CAN ve vozidle. Rychlostní profily trati byly měřeny v typických podmínkách při používání vozu pro dopravu do zaměstnání a zpět, čili v nejhustším denním provozu. Z více měřených jízd jsou pro výpočty tedy vybrány právě takové, které svým charakterem nejlépe odpovídají tomuto požadavku. Použité rychlostní profily byly zaznamenány dne 15.11.2016, a to konkrétně mezi 7:30 a 8:41 pro směr do Dejvic. V druhém směru byl rychlostní profil zaznamenáván až po uplynutí pracovní doby, tedy po 8 hodinách a 30 minutách. Konkrétně v čase mezi 17:30 a 18:44.

Z provedeného měření bylo dále zjištěno, že skutečná spotřeba vozidla, kterým bylo měření prováděno, byla o 10% vyšší než údaj, který udává výrobce pro městský provoz. Z tohoto důvodu byla pro další výpočty a porovnání o 10% zvýšena také spotřeba vozidla VW Golf GTI, které je použito jako konkurent dobíjecí verze vozu.

Záznam každé z jízd představoval soubor s více než 4 000 řádky, kdy každou vteřinu byla zaznamenána hodnota všech měřených kanálů. Vzhledem k obsáhlosti takového souboru, není k této práci připojen v tištěné podobě, ale pouze v elektronické na přiloženém CD nosiči.

Pomocí softwaru Diadem 2012 byla následně data upravena pro snadnější použití v tabulkovém procesoru Excel. Mezi hlavní úpravy dat patřilo přiřazení jednotek jednotlivým kanálům a jejich převod do základních jednotek soustavy SI. Dalším

krokem bylo vytvoření nových kanálů na základě rychlosti. Derivací rychlosti byl vytvořen kanál podélných zrychlení vozidla a integrací rychlosti podle času bylo dosaženo dráhového kanálu.

Další práce s těmito daty již probíhala výhradně s programem Microsoft Excel, protože je možné do něho snadněji zasahovat a umožňuje dobrý přehled o datech. V tomto programu bylo provedeno konečné rozdělení trasy na jednotlivé úseky. Kombinací výškového a rychlostního profilu byly získány hraniční body jednotlivých úseků. Po tomto rozdělení byly přidány další kanály k již připraveným datům. Jako první byl přidán kanál, vyjadřující sklon vozovky v jednotlivých úsecích trati a následně několik dalších kanálů, které však již měly většinou konstantní hodnoty a reprezentovaly technické údaje porovnávaných vozidel.

Po zavedení všech vstupů pro vyčíslení energií, byly vyjádřeny rovnice pro výpočet odporových energií. Tyto rovnice byly upraveny, aby odpovídaly integraci hodnot s časovou základnou signálu.

- Energie pro překonání odporu valení:

$$E_f = \int_{t_1}^{t_2} (m \cdot f \cdot g \cdot \cos(\alpha)) \cdot v \cdot dt \quad (5.1)$$

- Energie pro překonání odporu stoupání:

$$E_s = \int_{t_1}^{t_2} (m \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \cdot v \cdot dt \quad (5.2)$$

- Energie na překonání odporu zrychlení:

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} (1 + \vartheta) \cdot m \cdot a \cdot v \cdot dt \quad (5.3)$$

- Energie na překonání odporu vzduchu:

$$E_{vz} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2\right) \cdot v \cdot dt \quad (5.4)$$

Další významnou složkou spotřeby energie je již zmíněná spotřeba přídavných pohonů automobilu. Do této spotřeby jsou pro účely této práce zahrnuty energetické nároky posilovače řízení, posilovače brzd, řídicí jednotka pohonu, světla, kompresor

klimatizace a další drobné spotřebiče, jako například palubní rádio, nebo osvětlení přístrojové desky vozu.

Všechny uvedené spotřebiče, jsou při běžném provozu automobilu zapnuté, možná s výjimkou klimatizace. Pro účely této práce byly ovšem testovací jízdy pro záznam dat, uskutečněny se zapnutou klimatizací, aby byl simulován stav nutného odběru energie pro úpravu vzduchu v kabině automobilu. U vozu s elektrickým pohonem, bude totiž nutné téměř v každé situaci vydávat energii na úpravu vzduchu v kabině, ať už se bude jednat o ochlazování vstupujícího vzduchu v letních měsících, nebo o ohřívání chladného vstupujícího vzduchu v měsících zimních. Na rozdíl od vozidla s běžným spalovacím motorem, kde jsou velké přebytky odpadního tepla, je u elektromobilu nutné provádět i ohřev vzduchu pomocí elektrického ohřívače vzduchu. Pro účely této práce je uvažováno, že spotřeba energie pro ohřev i pro ochlazování vstupujícího vzduchu bude přibližně stejná.

5.2. Energetická náročnost trasy GTI

Ze získaných dat, byla pomocí rovnic (5.1) až (5.4) určena nejdříve energetická náročnost průjezdu zvolenou trasou pro standardní vůz VW Golf GTI. Z výpočtu vycházejí celkové spotřeby energie na překonání jednotlivých odporů. Po sečtení těchto energií získáme celkovou energii potřebnou pro pohyb vozidla a to konkrétně v úrovni kol vozu.

$$E_{p1i} = E_{f1i} + E_{s1i} + E_{a1i} + E_{vz1i} = 8,86 MJ \quad (5.5)$$

Pro získání celkové spotřebované energie na úrovni motoru vychází výpočet z uvažované průměrné spotřeby automobilu.

5.3. Energetická bilance spotřebičů

Pro číselné vyjádření spotřeby přídavných pohonů vozidla bylo nejdříve potřeba zjistit, jaký podíl z celkové vstupní energie v palivu, bude na mechanickém výstupu spalovacího motoru. K přiblížení hodnot, co nejbližší realitě bylo použito podkladů firmy Ricardo [9], které udávají účinnost přeměny energie z paliva na mechanický výstup motoru přibližně 23%, po odečtení veškerých ztrát, spojených například s dodávkou paliva do spalovacího prostoru, nebo vnitřním třením komponent motoru.

Volkswagen Golf GTI, který v této práci vystupuje jako konkurent své plug-in hybridní verze, má udávanou spotřebu pro městský provoz 8,1 l/100km. Při uvažovaném navýšení této spotřeby o 10%, bude tato spotřeba 8,91 l/100km.

Pro průjezd zvolenou trasou, dlouhou 20,1 km, tak spotřebuje množství benzínu, které je vyjádřeno následující rovnicí.

$$V_1 = \frac{M_p}{100} \cdot s_1 = \frac{8,91}{100} \cdot 20,1 = 1,79 \text{ l/100km} \quad (5.6)$$

kde: V_1celkový objem spotřebovaného paliva směrem do Dejvic

M_pprůměrná spotřeba paliva vozu GTI

s_1ujetá vzdálenost směrem do Dejvic

Tomuto množství paliva, odpovídá energie, která je v něm obsažena a jejíž vyjádření představuje rovnice (5.7)

$$E_1 = M_p \cdot s_1 \cdot \rho_b \cdot H_u = 0,0891 \cdot 20,1 \cdot 0,74 \cdot 46,4 = 61,493 \text{ MJ} \quad (5.7)$$

kde: E_1energie spotřebovaná pro jízdu směrem do Dejvic

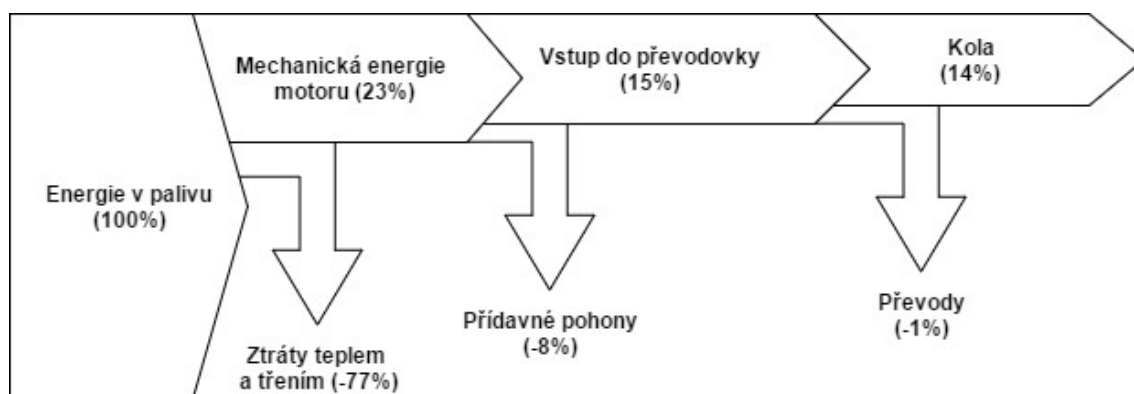
ρ_bměrná hmotnost benzínu

H_uvýhřevnost benzínu

Z výpočtů energetické náročnosti trasy při použití vozidla VW Golf GTI vyšlo, že pro pohon vozidla, bylo využito pouze 14% celkové spotřebované energie v palivu.

Ztráty v převodovce, byly určeny pomocí jednoduchého pravidla, kdy je uvažována účinnost čelního záběru ozubených kol 98%. Protože v použitém typu převodovky, jsou 2 páry kol, přenášející výkon čelním ozubením, je ztráta energie v převodovce $0,98^2$. Tato hodnota však odpovídá přibližně 1% energetické ztráty z celkového množství energie v palivu. Jak ilustruje obrázek číslo 8, k pohonu přídatných spotřebičů je využito zbylých 8% energie z paliva. To odpovídá situaci, když by automobil spotřebovával po celou dobu, kdy má zapnuté zapalování, energii s výkonem 1 235 W. Pro cestu do centra města tato hodnota odpovídá celkové spotřebě energie o velikosti 5 220 MJ.

Obrázek 8 – Bilance energie vozu se spalovacím motorem (vlastní úprava [9])



Pro další výpočty energetické náročnosti plug-in hybridní verze vozu bylo uvažováno, že spotřeba přídatných pohonů vozidla byla stejná, tedy také 1235 W. Tento výkon byl z baterií odebírán po celou dobu jízdy vozidla.

Z důvodu, že výrobce vozu nebyl ochoten sdílet žádné technické informace o svém voze a nepodařilo se získat ani žádnou podobnou bilanci využití energie v tomto uspořádání pohonu, byly účinnosti jednotlivých částí pohonného řetězce plug-in hybridního vozu zvoleny podle poznatků z výuky předmětu hybridní pohony na fakultě strojní, jehož výuka je z části zajišťována také odborníky z katedry elektrických pohonů a trakce fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. Na základě znalostí z tohoto předmětu a konzultací s vedoucím práce bylo rozhodnuto o zvolení těchto účinností s ohledem na obecně dosahované účinnosti přenosů energie v elektrické trakci při aplikaci na osobní automobily.

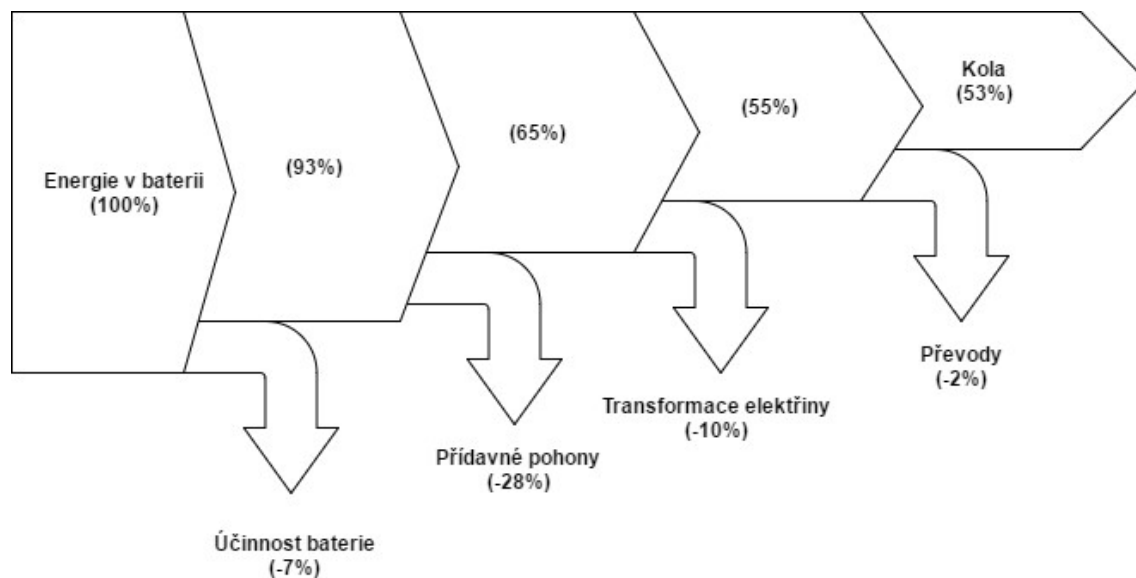
Zvolené účinnosti jsou: $\eta_b = 0,93$ účinnost nabíjení/vybíjení baterie

$\eta_m = 0,95$účinnost měniče napětí

$\eta_M = 0,95$účinnost elektromotoru

S uvažováním uvedených účinností jednotlivých prvků pohonného řetězce, rovnosti odběrů energie přídatnými pohony a vypočtené energetické náročnosti průjezdu zvolenou trasou, byla vytvořena uvažovaná bilance energií pro elektrický pohon vozu. Výsledná bilance je znázorněna na obrázku číslo 9.

Obrázek 9 – Bilance energie vozu s elektrickým pohonem



Díky tomuto vyjádření spotřeby přídatných pohonů plug-in hybridní verze vozu bylo možné určit, kolik energie z baterií, bude tento automobil potřebovat pro projetí stanované trasy, včetně započítání nutného příslušenství pro provoz.

5.4. Energetická náročnost trasy GTE

Stejným způsobem, jako byla vyjádřena energetická náročnost průjezdu trasy pro standardní automobil, byla tato energie vyčíslena také pro automobil s plug-in hybridním pohonem.

Jediný rozdíl u vozu s možností módu elektrické jízdy, oproti jeho standardní verzi, je možnost využití keruperace brzděné energie. Tento systém se snaží minimalizovat brzdění vozu pomocí běžných adhezních brzd automobilu a jejich zpomalující účinek nahrazuje použitím trakčního elektromotoru v generátorickém režimu. Tímto způsobem se v elektromotoru generuje elektrická energie, která může být následně opět použita pro pohon.

Účinnost této rekuperace byla pro potřeby výpočtu volena podle rovnice (5.8).

$$\begin{aligned} \eta_{rek} &= i_n \cdot \eta_{brzd} \cdot \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_M \cdot \eta_{prevod} = \\ &= 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,93 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,98^2 = 0,202 \end{aligned} \quad (5.8)$$

kde: i_npočet náprav brzděných elektromotorem

η_{brzd}účinnost využití brzd

η_búčinnost nabíjení/vybíjení baterie

η_múčinnost měniče napětí

η_Múčinnost elektromotoru

η_{prevod}účinnost mechanického převodu

Takto popsaná rekuperace byla zahrnuta do výpočtu pokaždé, kdy výslednice všech odporových sil vycházela záporně a bylo tak zřejmé, že vozidlo musí brzdit, aby si udrželo svoji rychlost, nebo zpomalovalo.

Přestože vůz s hybridním pohonem, má možnost rekuperovat brzdovou energii a tato možnost byla také zahrnuta ve výpočtech nutné energie pro pohon vozu, byla celkové spotřebovaná energie pro jízdu vyšší, než v případě standardní verze vozu. Tento rozdíl je způsoben vyšší hmotností vozu s bateriemi. Energie spotřebovaná vozem Golf GTE je vyčíslena v rovnici (5.9).

$$E_{p1e} = E_{f1e} + E_{s1e} + E_{a1e} + E_{vz1e} = 9,05 \text{ MJ} \quad (5.9)$$

Pokud budeme chtít vyjádřit, kolik energie z baterií, je potřeba pro takovou jízdu vyčerpat, je nutné přepočítat množství energie přivedené na kola, pomocí známých účinností přenosu. Tento krok, nelze učinit jednoduchou operací z výsledné potřebné energie na kolech, protože se v průběhu jízdy mění směr výslednice odporů a tím je ovlivněna rekuperace energie, která se musí promítnout do celkového výsledku. Velikost energie, kterou je potřeba získat pro pohon z baterie, musí být opět vyjádřena z tabulky, kde jsou nastaveny vzorce pro tento výpočet. Výsledek vyjadřuje rovnice (5.10).

$$E_{p_bat1e} = 11,50 \text{ MJ} \quad (5.10)$$

Tuto energii z baterie je nutné ještě navýšit o energii, kterou během jízdy spotřebují přídavné pohony. Ty za cestu vozu do centra spotřebovaly celkem 5,22 MJ.

Celková spotřeba energie, kterou potřebuje Golf GTE pro cestu z Jesenice do Dejvic, vyšla podle tohoto výpočtu 16,72 MJ, což odpovídá 4,65 kWh.

Pro účely této práce je uvažováno, že z celkové kapacity baterie plug-in hybridního vozu, je efektivně využitelná kapacita této baterie, 60%. Hodnotu využitelné kapacity baterie vyčísľuje rovnice (5.11)

$$E_{bat_ef} = E_{bat} \cdot 0,6 = 8,7 \cdot 0,6 = 5,22 \text{ kWh} \quad (5.10)$$

Z uvedeného vyplývá, že po příjezdu vozu do Dejvic, již zbývá v baterii pouze 0,57 kWh, pro jízdu zpět.

5.5. Jízda do Jesenice

Pro vyhodnocení energetické náročnosti při zpáteční cestě, byl postup obdobný, jako pro cestu do Dejvic. U vozidla s pouze zážehovým motorem, bylo na cestu zpět spotřebováno množství paliva, vyjádřeného rovnicí (5.11)

$$V_2 = \frac{M_p}{100} \cdot s_2 = \frac{8,91}{100} \cdot 21,2 = 1,89 \text{ l/100km} \quad (5.11)$$

kde: V_2celkový objem spotřebovaného paliva směrem do Jesenice

s_2ujetá vzdálenost směrem do Jesenice

Tomuto množství paliva, odpovídá energie, která je v něm obsažena a jejíž vyjádření představuje rovnice (5.12)

$$E_2 = M_p \cdot s_2 \cdot \rho_b \cdot H_u = 0,0891 \cdot 21,2 \cdot 0,74 \cdot 46,4 = 64,858 \text{ MJ} \quad (5.12)$$

kde: E_2energie spotřebovaná pro jízdu směrem do Jesenice

V případě hybridní verze automobilu, nyní připadají v úvahu dvě možné varianty výpočtu energie pro zpáteční cestu. První varianta představuje tu možnost, kdy vozidlo vyrazí na cestu do Jesenice s energií v bateriích, která zbyla po ranní jízdě do Dejvic. V tom případě bude možné na energii z baterií ujet pouze 1,7 km a dál bude muset pokračovat s využitím spalovacího motoru. Tím se bohužel dostáváme k další informaci, která není dostupná a to ke spotřebě vozu, pokud dojdou baterie a je nutné pokračovat v jízdě pomocí spalovacího motoru. Pro tuto variantu byla zvolena průměrná spotřeba automobilu 9,0 l/100km.

Z uvedeného vyplývá, že pro dojetí do Jesenice bude potřeba zbývajících 19,5 km dojet se zapnutým spalovacím motorem a tím bude spotřebováno množství paliva vyjádřené rovnicí (5.13)

$$V_{2e} = \frac{M_{pe}}{100} \cdot s_{2_zb} = \frac{9,00}{100} \cdot 19,5 = 1,75 \text{ l/100km} \quad (5.13)$$

Druhá varianta cesty domů plug-in hybridním vozem je taková, že bude možnost nabít baterie automobilu během pracovní doby a na cestu domů je poté možné vyrazit s plně nabitými bateriemi.

V takovém případě, bude množství energie potřebné pro jízdu do Jesenice odpovídat množství dle rovnice (5.14).

$$E_{bat2e} = 19,17 \text{ MJ} = 5,26 \text{ kWh} \quad (5.10)$$

Hodnota 5,26 kWh odpovídá 60,46% celkové kapacity baterie a je tedy otázkou, jak by se ve skutečnosti zachoval řídicí systém automobilu. Pokud by respektoval podmínku, že využitelná kapacita baterie je 60% a nepřipustil by krátkodobě hlubší vybití, bylo by nutné, nastartovat motor pouze na posledních několik sekund provozu, kvůli zaparkování vozu. Protože při parkovacích manévrech nejsou potřeba žádné vysoké výkony motoru je pravděpodobné, že by vůz projel celou trasu na elektřinu, aniž by za celý den potřeboval nastartovat spalovací motor.

6. Analýza návratnosti investice

Ze změřených a vypočítaných hodnot je nyní možné vyčíslit, jaká bude skutečná finanční úspora při provozování vozidla s plug-in hybridním pohonem.

K tomuto účelu je potřeba znát ceny energií na současném trhu. Pokud zákazník dodavateli elektrické elektřiny doloží, že má možnost ve své domácnosti provozovat vůz s možností dobíjení z elektrické sítě, může si zažádat o speciální tarif e-mobilita s kódovým označením D27d. V tomto tarifu je poté zákazníkovi dodávána energie s cenou 1,803 Kč/kWh. K této částce je nutné připočítat ještě stálý měsíční poplatek za odběrné místo, který činí 79 Kč/měsíc. Při uvažování 20 pracovních dní v měsíci, bude ke každému dni provozu plug-in hybridního automobilu připočteno 2 Kč, jako nezbytný náklad na provoz dobíjecího vozu. Výhodou tohoto tarifu však zůstává, že zákazník nakupuje veškerou elektřinu s touto cenou a může tak tedy ušetřit i na elektřině, kterou využije na provoz domácnosti. [12]

Cena benzínu použitá pro výpočet návratnosti investice do plug-in hybridního vozu vychází z průměrné ceny této komodity 24.1.2017, kdy cena benzínu byla 30,97 Kč/litr. [13]

6.1. Provoz běžného GTI

Jako první vyjádříme, na kolik by přišlo provozovat po uvažované trati Volkswagen Golf GTI, jehož popis je uveden v úvodních kapitolách této práce. Vyjádření ceny provozu tohoto vozu je nejsnazší, protože pro svůj pohon využívá pouze jeden zdroj energie.

$$C_{GTI} = (V_1 + V_2) \cdot C_{ben} = (1,79 + 1,89) \cdot 30,97 = 113,97 \text{ Kč} \quad (6.1)$$

6.2. Úspory bez možnosti dobití

Pro tento případ budeme uvažovat provoz plug-in hybridního vozidla dle prvního scénáře. To znamená, že s plně nabitými bateriemi vyrazíme ráno do centra Prahy, kde vůz zaparkujeme a po skončení pracovní doby vyrazíme zpět na cestu domů.

Z výpočtu potřebných energií vyšlo, že bychom pro tuto variantu provozu potřebovali celou využitelnou kapacitu baterie a ještě bychom denně potřebovali dalších 1,75 litrů benzínu navíc. Vyjádření nákladů na denní spotřebu energií ukazuje rovnice (6.2).

$$\begin{aligned} C_{GTE1} &= E_{bat_{ef}} \cdot C_{el} + V_{2e} \cdot C_{ben} + 2 = \\ &= 5,22 \cdot 1,803 + 1,75 \cdot 30,97 + 2 = 65,61 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (6.2)$$

6.3. Úspory s možností dobití

Z výpočtu pro tento scénář vychází, že vozidlo by s dobitím uprostřed trasy, dokázalo projet Prahou z Jesenice do centra a zase zpět, pouze na elektrický pohon z baterií. To je pro uživatele vozu beze sporu výhodné, protože může výhod elektrického pohonu využívat déle.

S touto variantou však přichází jiná otázka a tou je cena nabíjení vozidla v zaměstnání. Protože síť dobíjecích stanic pro elektromobily není v České republice ještě dostatečně rozsáhlá, nejsou jasné ani ceny dobíjení automobilů.

Cena je rozdílná případ od případu, kdy někteří provozovatelé v rámci reklamních kampaní nabízí své dobíjecí stojany zdarma, jinde mohou požadovat poměrně vysoké částky za nabíjení. Existují také provozovatelé dobíjecích stanic, kteří neumožňují jednorázové dobití vozu, ale své služby poskytují pouze na základě dlouhodobějšího závazku vázaného smlouvou.

Trh zkrátka ještě není dostatečně rozvinut, aby bylo možné vypočítat průměrné ceny elektřiny za kilowatthodinu. Proto se při výpočtu nákladů na provoz plug-in hybridního vozu, budeme držet známé ceny, kterou nabízí distributor PRE do domácností. Vyjádření ceny ukazuje rovnice (6.3).

$$\begin{aligned}C_{GTE1} &= (E_{bat1e} + E_{bat2e}) \cdot C_{el} + 2 = \\ &= (4,65 + 5,26) \cdot 1,803 + 2 = 19,87 \text{ Kč} \quad (6.3)\end{aligned}$$

6.4. Denní úspory a návratnost investice

Nyní máme již všechny potřebné informace pro vyhodnocení úspor při provozování plug-in hybridního vozidla, zastoupeného konkrétně Volkswagenem Golf GTE. Pro zhodnocení návratnosti budeme uvažovat, že běžný rok má 250 pracovních dní, kdy je možné využívat výkon hybridního vozu, pro dojíždění do zaměstnání. Při tomto provozu tak vůz najede přibližně 10 000 km za rok.

Z uvedeného vyplývá, že při provozu vozidla podle prvního scénáře, kdy jediným zdrojem energie pro baterie vozu je zásuvka v našem domě a zbývající vzdálenost, kdy už nám nestačí kapacita baterie, musí vůz urazit se spuštěným spalovacím motorem, bude celková denní úspora činit 48,36 Kč.

To znamená, že při denním provozu bude roční úspora dobíjitelného vozu celkem 12 090 Kč. Po 5 letech by tato úspora činila již 60 450 Kč. Při stálých cenách, podmínkách na trhu a kapacitě by se investice do nákupu plug-in hybridní verze mohla vrátit za více než 22 let. Z toho vyplývá, že při provozování vozu podle scénáře jedna, se investice do této technologie prakticky nemůže navrátit, protože daleko přesahuje životnost vozu GTE, pravděpodobně i GTI.

Srovnáme-li denní náklady na provoz podle druhého scénáře, kdy využíváme čas, který trávíme v zaměstnání k doplnění baterií našeho vozu, zjistíme, že celkový rozdíl činí 94,10 Kč. Z toho vyplývá, že roční úspora na provoz plug-in hybridního vozu bude nyní 23 525 Kč. Při provozování takového vozu po dobu 5 let, můžeme uspořit až 117 625 Kč. Částky už jsou to výrazně vyšší, nežli v prvním případě, ale stále vychází poměrně vysoká doba návratnosti investice do tohoto systému pohonu, kdy bychom za stejných podmínek museli provozovat vůz minimálně 11. Otázkou stále zůstává, kolik by nás mezitím stál servis takového vozu. Na rozdíl od čistého elektromobilu, kdy dochází k výraznému zjednodušení celého pohonného řetězce, totiž u plug-in hybridní verze dochází k pravému opaku a celý systém pohonu vozu se stává zdatelně složitější.

7. Závěr

Z provedeného výzkumu vyšlo hodnocení, že v současné době se investice do plug-in hybridního pohonu automobilu, s baterií o kapacitě do 9 kWh, vyplatí pouze v případě, že bude možné automobil dostatečně často nabíjet a rozdíl v ceně, oproti standardní verzi, nebude vyšší než 60 000 Kč. V ostatních případech bude provoz automobilu s tímto pohonem zřejmě ekonomicky nevýhodný.

Jistou možností, jak zatraktivnit nákup takového vozu pro širší veřejnost, je podpora této ekologické verze vozu dotací ze strany státu. Již nyní v České republice existují dotační programy na nákup ekologických plug-in hybridních vozů, ty však zatím mohou využívat pouze právnické osoby, nicméně už je připraven návrh na rozšíření možného okruhu žadatelů o dotace na nákup nového vozu.

Zajímavou informací beze sporu je, že prodeje vozu Volkswagen Golf GTE v loňském roce, se celosvětově zastavily na hodnotě 11 351 kusů.[14] To rozhodně není nízké číslo a ukazuje nám, že existují trhy, kde má pravděpodobně koupě takového vozu smysl.

Provedené měření je první snahou, pokusit se analyzovat možné úspory alternativních pohonů osobních automobilů. Tato práce používá originální metodiku vyhodnocení a může tak být použita jako návod pro další, hlubší výzkum popisované problematiky.

8. Zdroje

- [1] Národní energetický mix. *OTE* [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/narodni-energeticky-mix/narodni-energeticky-mix>
- [2] KENDÍK, Lukáš. *Determining the Energy Performance of City Bus Route*. 2015. Bachelor thesis. Fakulta strojní, ČVUT v Praze.
- [3] *Mapové podklady pro Českou republiku* [online]. 2017 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: www.mapy.cz
- [4] PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [5] *Ceník VW Golf GTI* [online]. 2015 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://vw4.cz.volkswagen.at/modely/golf-gti/ceniky-a-data/ceniky>
- [6] *Volkswagen Golf GTE: cena, dojezd, specifikace* [online]. 2016 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/volkswagen-golf-gte-cena-dojezd-specifikace>
- [7] *Technická data VW Golf GTE* [online]. [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-liberec.cz/images/autoenge/block/golf-gte/cenik/vw-golf-gte-technicka-data.pdf>
- [8] *Volkswagen Golf TSI BlueMotion* [online]. 2015 [cit. 2017-01-21]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/predstavujeme/volkswagen-golf-tsi-bluemotion-usporny_44278.html
- [9] *Ricardo - Low CO2 automotive technology: Engineering the Low Carbon Future* [online]. 2013 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: https://www.ricardo.com/Documents/Downloads/pdf/LowCO2_Tech_2013_v21%20LR.pdf
- [10] *Škoda Fabia 3. generace* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/models/nova-fabia>
- [11] *Volkswagen Golf GTE* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://insideevs.com/wp-content/uploads/2014/09/DB2014AU01017_large.jpg
- [12] *PRE: Ceník elektřiny pro domácnost* [online]. 2016 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/Files/domacnosti/elektrina/archiv-produktu/2016/cenik-produktu-komfort-od-1-1-2016-kompletni/>

[13] *Cena benzínu* [online]. 2016 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z:

<http://www.ceskybenzin.cz/>

[14] *Elektromobily vpřed: Ceny baterií klesají, masový nástup elektroaut začíná* [online]. 2016 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z:

http://ekonomika.idnes.cz/elektromobil-elektroauto-prodej-boom-evropa-cesko-f8m-/eko-zahranicni.aspx?c=A170210_191802_eko-zahranicni_ane

9. Přehled použitých veličin

G.....tíha vozidla [N]

e.....rameno valivého odporu [m]

f.....součinitel odporu valení [1]

r_ddynamický poloměr pneumatiky [m]

αúhel sklonu vozovky [°]

Z_kzatížení jednoho kola [N]

O_{fk}odpor valení jednoho kola [N]

O_fodpor valení všech čtyřech kol [N]

m.....hmotnost vozidla [kg]

g.....gravitační zrychlení Země [$N \cdot s^{-2}$], (zde $g = 9,81 N \cdot s^{-2}$)

O_sodporová síla stoupání [N]

O_aodporová síla zrychlení [N]

O_{ap}odpor zrychlení posuvných hmot [N]

O_{ar}odpor zrychlení rotujících hmot [N]

a.....podélné zrychlení vozidla [$m \cdot s^{-2}$]

M_rmoment k urychlení rotačních částí vozidla [Nm]

M_{rm}moment k urychlení rotačních částí motoru [Nm]

M_{rp}moment k urychlení rotačních částí převodovky [Nm]

M_{rk}moment k urychlení kol [Nm]

J_mmoment setrvačnosti motoru [$kg \cdot m^{-2}$]

J_pmoment setrvačnosti převodovky [$kg \cdot m^{-2}$]

J_kmoment setrvačnosti kol [$kg \cdot m^{-2}$]

i_ccelkový převod od motoru na kola [1]

i_rpřevod rozvodovky [1]

ηmechanická účinnost [1]

ϑsoučinitel vlivu rotačních částí [1]

O_{vz}aerodynamický odpor [N]

ρměrná hmotnost vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$], (zde $\rho = 1,27 kg \cdot m^{-3}$)

- S_xčelní plocha vozu [m^2]
 c_xsoučinitel odporu vzduchu [1]
 vrychlost vozidla [$m.s^{-1}$]
 t_1počáteční bod časového intervalu [s]
 t_2koncový bod časového intervalu [s]
 E_fenergie odporu valení [J]
 E_senergie odporu stoupání [J]
 E_aenergie odporu zrychlení [J]
 E_{vz}energie odporu vzduchu [J]
 E_{pli}energie pro pohon vozu GTI do Dejvic [J]
 V_1objem spotřebovaného paliva vozem GTI do Dejvic [dm^3]
 M_pprůměrná spotřeba vozu GTI [l/100km]
 s_1délka trasy do Dejvic [km]
 E_1energie spotřebovaná vozem GTI při jízdě do Dejvic [J]
 ρ_bměrná hmotnost benzínu [g/cm^3]
 H_uvýhřevnost benzínu [MJ/kg]
 η_búčinnost baterie [1]
 η_múčinnost měniče [1]
 η_M účinnost elektromotoru [1]
 η_{b}účinnost nabíjení/vybíjení baterie [1]
 η_{rek}účinnost rekuperace brzděné energie [1]
 i_npočet brzděných náprav [1]
 η_{brzd}účinnost využití brzd [1]
 η_{prevod}účinnost mechanického převodu [1]
 E_{p1e}energie pro pohyb vozu GTE do Dejvic [J]
 E_{f1e}energie pro překonání odporu valení vozu GTE do Dejvic [J]
 E_{s1e}energie pro překonání odporu stoupání vozu GTE do Dejvic [J]
 E_{a1e}energie pro překonání odporu zrychlení vozu GTE do Dejvic [J]
 E_{vz1e}energie pro překonání odporu vzduchu vozu GTE do Dejvic [J]

E_{p_bat1e}energie pro pohon dodaná z baterie vozu GTE do Dejvic [J]

E_{bat_ef}efektivně využitelná kapacita trakční baterie [kWh]

E_{bat}celková kapacita trakční baterie [kWh]

V_2objem spotřebovaného paliva vozem GTI do Jesenice [dm^3]

s_1délka trasy do Jesenice [km]

E_1 energie spotřebovaná vozem GTI při jízdě do Jesenice [J]

E_{bat2e}celková energie dodaná baterií při jízdě do Jesenice [J]

C_{GTI}denní náklady na provoz vozu GTI [Kč]

C_{ben}cena benzínu [Kč/litr]

C_{el}cena elektřiny [Kč/kWh]

C_{GTE1}denní náklady na provoz vozu GTE podle první varianty [Kč]

C_{GTE2}denní náklady na provoz vozu GTE podle druhé varianty [Kč]

10. Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 – Celkový přehled trasy [3].....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Obrázek 2 – Detail cesty do Dejvic [3].....</i>	<i>- 15 -</i>
<i>Obrázek 3 – Detail cesty do Jesenice [3].....</i>	<i>- 15 -</i>
<i>Obrázek 4 – Výškový profil trasy.....</i>	<i>- 16 -</i>
<i>Obrázek 5 – Škoda Fabia 3. generace [10].....</i>	<i>- 17 -</i>
<i>Obrázek 6 – Volkswagen Golf GTE [11].....</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Obrázek 7 – Posun působitě sil na kolo [4].....</i>	<i>- 22 -</i>
<i>Obrázek 8 – Bilance energie vozu se spalovacím motorem (vlastní úprava [9]).....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Obrázek 9 – Bilance energie vozu s elektrickým pohonem.....</i>	<i>- 33 -</i>

11. Přílohy

Příloha 1 – Seznam dělicích bodů trasy do Dejvic

Číslo úseku	Délka úseku	Počáteční výška	Koncová výška	Koncový bod
	[m]	[m.n.m]	[m.n.m]	---
0	0	351	351	Jesenice - start
1	491	351	345	Semafor (V Lukách)
2	456	345	348	Vrchol
3	320	348	346	Zlom
4	319	346	335	Semafor (Šátalka)
5	907	335	320	Semafor (Satina)
6	628	320	312	Kruhový objezd
7	139	312	310	Výjezd z objezdu
8	842	310	298	Kruhový objezd 2
9	59	298	298	Výjezd z objezdu 2
10	482	298	291	Zlom
11	561	291	297	Semafor (K Bětání)
12	507	297	293	Kruhový objezd 3
13	47	293	293	Výjezd z objezdu 3
14	470	293	291	Zlom
15	937	291	264	Semafor (Zelená louka)
16	404	264	257	Semafor ústav mateřství
17	629	257	238	Semafor - Thomayerova n.
18	635	238	219	Semafor (U Krčského nádraží)
19	217	219	220	Semafor (Nájezd na MO)
20	206	220	224	Semafor (2. Nájezd na MO)
21	63	224	225	Semafor (MO-Budějovická)
22	429	225	252	Kačerov - vjez do zatáčky
23	43	252	255	Kačerov - výjezd ze zatáčky
24	633	255	273	Semafor (Antala Staška)
25	211	273	269	Semafor (Olbrachtova)
26	346	269	268	Semafor (Vokáčova)
27	411	268	266	Semafor (Na Strži)
28	108	266	266	Semafor (Arkády)
29	150	266	265	Semafor (Hvězdova)
30	512	265	247	Semafor (Děkanská vinice I)
31	110	247	242	Semafor (Lomnického)
32	1201	242	193	Semafor (Podolská vodárna)
33	242	193	192	Semafor (Apolinář)
34	626	192	192	Semafor (Libušina)
35	82	192	192	Semafor (Železniční most)
36	416	192	195	Semafor (Palackého nám. Ch.)
37	61	195	197	Semafor (Palackého náměstí)
38	287	197	194	Semafor (Jiráskův most)
39	181	194	193	Semafor (Myslíkova)
40	733	193	188	Smetanovo nábřeží
41	302	188	192	Karlův most
42	299	192	190	Kaprova
43	421	190	192	Semafor (Klárov)
44	1250	192	229	Milady Horákové
45	211	229	223	Jaselská
46	257	223	219	Semafor (Bubenečská)
47	268	219	217	Semafor (nám. Svobody)
48	108	217	217	Semafor (nám. Svobody 2)
49	147	217	219	Semafor (Vítězné náměstí)
50	529	219	211	Velfíkova
51	322	211	215	Parkoviště NTK

Příloha 2 – Seznam dělicích bodů trasy do Jesenice

Číslo úseku	Délka úseku	Počáteční výška	Koncová výška	Koncový bod
	[m]	[m.n.m]	[m.n.m]	---
0	0	215	215	Parkoviště NTK
1	419	215	221	Zatáčka Zíkova
2	363	221	230	Semafor Evropská
3	640	230	218	Výjezd Svatovítská
4	532	218	244	Semafor (Milady Horákové)
5	824	244	229	Semafor (Letenské sady)
6	1250	229	192	Semafor (Klárov)
7	421	192	190	Kaprova
8	299	190	192	Karlův most
9	302	192	188	Smetanovo nábřeží
10	733	188	193	Semafor (Myslíkova)
11	181	193	194	Semafor (Jiráskův most)
12	287	194	197	Semafor (Palackého náměstí)
13	61	197	195	Semafor (Palackého nám. Ch.)
14	416	195	192	Semafor (Železniční most)
15	82	192	192	Semafor (Libušina)
16	626	192	192	Semafor (Apolinář)
17	242	192	193	Semafor (Podolská vodárna)
18	1201	193	242	Semafor (Lomnického)
19	110	242	247	Semafor (Děkanská vinice I)
20	512	247	265	Semafor (Hvězdova)
21	150	265	266	Semafor (Arkády)
22	108	266	266	Semafor (Na Strži)
23	411	266	268	Semafor (Vokáčova)
24	346	268	269	Semafor (Olbrachtova)
25	211	269	273	Semafor (Antala Staška)
26	633	273	255	Kačerov - výjezd ze zatáčky
27	43	255	252	Kačerov - vjezd do zatáčky
28	429	252	225	Semafor (MO-Budějovická)
29	63	225	224	Semafor (2. Nájezd na MO)
30	206	224	220	Semafor (Nájezd na MO)
31	217	220	219	Semafor (U Krčského nádraží)
32	635	219	238	Semafor - Thomayerova n.
33	629	238	257	Semafor ústav mateřství
34	404	257	264	Semafor (Zelená louka)
35	937	264	291	Zlom
36	470	291	293	Výjezd z objezdu 3
37	47	293	293	Kruhový objezd 3
38	507	293	297	Semafor (K Bětání)
39	561	297	291	Zlom
40	482	291	298	Výjezd z objezdu 2
41	59	298	298	Kruhový objezd 2
42	842	298	310	Výjezd z objezdu
43	139	310	312	Kruhový objezd
44	628	312	320	Semafor (Satina)
45	907	320	335	Semafor (Šátalka)
46	319	335	346	Zlom
47	320	346	348	Vrchol
48	456	348	345	Semafor (V Lukách)
49	491	345	351	Jesenice - cíl