

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Porovnání vozidel s různými zdroji energie
Comparison of vehicles with different energy sources

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Vašíček, CSc.

Metoděj Černý

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Metoděj** Osobní číslo: **491849**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání automobilů s různými zdroji energie

Název bakalářské práce anglicky:

Vehicle operation with Different Energy Sources Evaluation

Pokyny pro vypracování:

1. Identifikujte parametry vozidel na klasický benzinový nebo naftový pohon, CNG/LPG a elektromobily
2. Navrhněte modelové příklady provozu vozidla
3. Porovnejte náklady na provoz a emise jednotlivých automobilů.
4. Proveďte vícekritériální vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- 1) J. Kameš, Alternativní pohon automobilů. Praha: BEN - technická literatura, 2004
- 2) Kislíngerová a kol: Manažerské finance, Beck 2007, 2.vydání, ISBN/978-80-7179-903-0
- 3) Národní akční plán čisté mobility, MPO ČR, 2021

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Vašíček, CSc. katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **17.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Jiří Vašíček, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

Datum:

.....

podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za odborný dohled, vstřícnost během konzultací a cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je zhodnocení provozu automobilů s odlišnými zdroji energie z ekonomického, ekologického a uživatelského hlediska. V první části práce představuji technické parametry zástupců naftového, plynového a elektrického pohonu. Za účelem znázornění modelů provozu vozidel jsem využil referenční rodiny lišící se ročním nájezdem a stylem života. Ekonomická část práce sestává z kalkulace nákladů spojených s provozem a výsledného porovnání na základě kritéria ekonomické efektivnosti NPV a citlivostní analýzy. Součástí práce je rovněž porovnání dopadu jednotlivých subjektů na životní prostředí, kde je posuzována fáze výroby, provozu a likvidace vozidla. Závěrem práce provádím vícekritériální analýzu, jejíchž cílem je popsat a následně zhodnotit možné výhody a nevýhody vozidel.

Klíčová slova

Spalovací motor, elektromobilita, emise CO₂, skleníkové plyny, Škoda Auto, Tesla, trakční baterie, dobíjecí stanice, provozní náklady, CNG

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to evaluate the operation of cars with different energy sources from the economic, ecological and user point of view. In the first part of the thesis I present the technical parameters of representatives of diesel, gas and electric powertrains. The model of vehicle operation is represented by reference families differing in annual mileage and life style. The economic part of the thesis consists of the calculation of all costs associated with the operation of the vehicles and the resulting comparison based on the NPV criterion and sensitivity analysis. The thesis also includes a comparison of the environmental impact of each entity, where the production, operation and disposal phases of the vehicle are included. Finally, the thesis concludes with a multi-criteria analysis to describe and then evaluate the possible advantages and disadvantages of the vehicles.

Key words

Combustion engine, electromobility, CO₂ emissions, greenhouse gases, Skoda Auto, Tesla, traction battery, charging station, operational costs, CNG

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Vybraná vozidla	3
2.1 Škoda Octavia 2,0 TDI	4
2.2 Škoda Octavia 1,5 TGI	5
2.3 Tesla Model 3	6
3. Nabíjení elektromobilu	8
3.1 Baterie elektromobilu.....	8
3.2 Střídavé nabíjení	10
3.2.1 Nabíjecí konektory	10
3.2.2 Simulace nabíjení vozu Tesla Model 3	11
3.3 Stejnoseměrné nabíjení	12
3.3.1 Nabíjecí konektory	12
3.3.2 Simulace nabíjení vozu Tesla Model 3	13
4. Modelové použití vozidel.....	15
4.1 Referenční rodina A.....	15
4.2 Referenční rodina B	16
4.3 Referenční rodina C	17
5. Porovnání ekonomických parametrů vozidel.....	18
5.1 Pořizovací cena vozidla	19
5.2 Prodej vozidla	19
5.3 Palivové náklady.....	21
5.3.1 Škoda Octavia 2,0 TDI.....	22
5.3.2 Škoda Octavia G-Tec 1,5 TGI	23
5.4 Náklady na nabíjení elektromobilu	24
5.4.1 Náklady na elektřinu	24
5.4.2 Domácí nabíjení	24
5.4.3 Veřejné a firemní nabíjení.....	26
5.5 Provozní náklady	28
5.5.1 Servisní náklady	28
5.5.2 Pojištění a poplatky.....	29
5.5.3 Parkování	30
5.6 Výsledky ekonomického zhodnocení	30
5.6.1 NPV.....	30
5.6.1.1 Referenční rodina A.....	31

5.6.1.2 Referenční rodina B	31
5.6.1.3 Referenční rodina C	32
5.6.2 Citlivostní analýza.....	34
5.6.2.1 Referenční rodina A	34
5.6.2.2 Referenční rodina B	36
5.6.2.3 Referenční rodina C	38
6. Porovnání dopadu vozidel na životní prostředí.....	42
6.1 Výroba.....	44
6.2 Provoz	45
6.3 Likvidace.....	47
7. Vícekriteriální analýza.....	49
7.1 Rozhodovací kritéria	49
7.1.1 Charakteristika kritérií	49
7.1.2 Bodové hodnocení.....	52
7.2 Určení vah kritérií	53
7.3 Vyhodnocení	55
8. Závěr	56
Seznam zdrojů.....	59
Seznam obrázků	63
Seznam grafů	63
Seznam tabulek	64

1. Úvod

Automobil lze zařadit mezi jeden z nejpoužívanějších dopravních prostředků moderní doby. Stal se neodmyslitelnou součástí lidského života. Velmi diskutovaným aspektem silniční dopravy je zmírnění nepříznivých dopadů na lidský organismus a životní prostředí. Klimatická změna je jednou z ekologicky i ekonomicky nejvýznamnějších otázek dnešní doby. Globální růst teplot vede ke zvyšování hladin oceánů, úbytku mořských živočichů a k častějším výkyvům extrémních teplot. Ze zmíněných důvodů je celosvětovým zájmem vyspělých států prosazovat strategie a opatření vedoucí ke snížení negativních dopadů dopravního sektoru na kvalitu ovzduší. S cílem snížení tvorby skleníkových plynů CO_2 , NO_x a pevných částic produkovaných silniční dopravou zavádí Evropská unie emisní normy, stanovující emisní limity silniční dopravy. Evropská rada schválila přísnější emisní normy osobních automobilů, přičemž do roku 2030 musí dojít k snížení produkce emisí o 37,5 % v porovnání s rokem 2021 [1]. Požadavek je možné dodržet nástupem zdokonalených konvenčních motorů nebo rapidním zvýšením zastoupení nízkoemisních automobilů na trhu. Z těchto důvodů neustále roste ve vozovém parku podíl alternativních pohonů a je možné konstatovat, že trend bude pokračovat.

V souvislosti s alternativními pohony se dnes hovoří hlavně o automobilech na stlačený zemní plyn CNG, zkapalněný ropný plyn LPG, o hybridních vozech kombinujících konvenční motor s elektrickým pohonem a o čistě elektrických pohonech. Plynové pohony nabízejí často obecně úspornější provoz a tišší chod v porovnání s konvenčními pohony. Po ekologické stránce vozidla na zemní plyn produkují menší míru škodlivých látek a pevných částic. Vzhledem ke skutečnosti, že automobilové společnosti dnes nabízejí pestřejší portfolio plynových modelů, jsou pořizovací ceny továrně upravených plynových agregátů srovnatelné s konvenčními automobily. Mezi jejich nevýhody lze zařadit horší dostupnost paliva v souvislosti s řídkou sítí čerpacích stanic a zákaz parkování v označených podzemních prostorách.

Velmi diskutovaným typem vozidla je v dnešní době elektromobil. V rámci silniční dopravy lze rozlišit tři základní typy zdrojů energie k pohonu čistě elektrického vozidla. Vozidlo může být napájeno trakčním vedením (tramvaje, trolejbusy), není však schopno samostatného pohybu bez přímého napájení. Dalším zdrojem napájení vozidla je palivový článok. Palivový článok je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii vodíkového paliva sloučeného se vzduchem na elektrickou energii. Vedlejším produktem je teplo a voda. Technologie vodíkového pohonu je ale v rámci automobilového průmyslu teprve na začátku, jelikož se jedná o velmi nákladný vývoj a pořizovací cena je zatím vysoká. Na území České republiky se plánuje v současné době výstavba malého počtu plnicích stanic určených pro komerční použití. Levnější a rozšířenější alternativou energetického zdroje představuje trakční baterie. Baterie je v dnešní době velmi rozšířeným zdrojem energie pro pohyb elektromobilu. Na druhu baterie závisí důležité parametry vozu jako jsou dojezd, hmotnost a rychlost nabíjení. Elektromobil má řadu nesporných výhod. Absence převodovky má za následek plynulejší a dobře ovladatelnou jízdu. Provoz je lokálně bezemisní a díky relativní konstrukční jednoduchosti motoru a různých komponentů je údržba ve srovnání se spalovacími motory minimální. Mezi nedostatky z pohledu uživatele můžeme zařadit menší celkový dojezd, delší dobu nabíjení a vyšší pořizovací cenu v porovnání s konvenčními automobily.

V práci hodnotím provoz tří druhů pohonů z ekologického, uživatelského a ekonomického hlediska za předpokladu různých provozních scénářů. Za tímto účelem jsem definoval referenční rodiny, které se liší velikostí ročního nájezdu, životní situací a způsobem nabíjení elektromobilu. V první části práce uvedu ucelený přehled technických parametrů vozidel, včetně spotřeby, výbavy a pořizovací ceny. Následně se zaměřím na problematiku nabíjení elektromobilů jak po technické stránce, tak po uživatelské stránce. Ve čtvrté kapitole představím modelové použití vozidel spolu s charakteristickými parametry referenčních rodin. Vzhledem k tomu, že při výběru automobilu hraje ekonomická stránka pro zákazníka významnou roli, podstatnou část práce se zaměřím na výpočet a popis pořizovacích, provozních a palivových nákladů jednotlivých zástupců výběru. Ve vztahu

k problematice dopadu provozu automobilu na životní prostředí provedu v rámci šesté kapitoly popis jednotlivých životních fází spolu s vyhodnocením emisní stopy jednotlivých pohonů. Závěrem práce provádím vícekritériální analýzu, jejíž cílem je popsat a následně zhodnotit možné výhody a nevýhody vozidel.

2. Vybraná vozidla

Silniční doprava sestává z mnoha různých dopravních prostředků, od osobních a nákladních automobilů, po autobusy a motocykly. I když je transformace dopravy a zvyšování zastoupení alternativních pohonů aktuálním tématem v mnoha odvětvích, v mé práci budu mezi sebou porovnávat pouze modely osobní dopravy, určené pro běžnou a soukromou přepravu osob. Jednotlivé modely jsem vybral na základě podobnosti rozměrových parametrů, způsobu užití a výbavy. Patří mezi ně jeden z nejúspěšnějších vozů automobilky Škoda a nejprodávanější elektromobil automobilky Tesla. V rámci druhé kapitoly budou představeny modely řady Octavia čtvrté generace, uvedené na trh v roce 2019, v naftové a plynové variantě. Jako zástupce čistě elektrického vozu jsem vybral Tesla Model 3. Model byl prvním masově prodávaným vozem americké automobilky Tesla a je označen za globálně nejprodávanější elektromobil roku 2020 [2].

Jelikož výběr zástupců rozdílných pohonů sloužících k objektivnímu porovnání není triviální úkol, je nejprve potřeba si definovat společné parametry. Jízdní projev automobilů je složité hodnotit, protože elektromotor vykazuje odlišnou momentovou a výkonovou charakteristiku ve srovnání s motorem spalovacím. Elektromobil má okamžitě dostupný vysoký točivý moment, což se vznětovým a zážehovým motorem nelze tak snadno dosáhnout. Z toho důvodu vzniká určitý rozdíl maximálních výkonů mezi čistě elektrickým, plynovým a naftovým pohonem. Při porovnání jízdního projevu panuje největší podobnost mezi naftovým a plynovým pohonem, jelikož motor na stlačený zemní plyn představuje konfiguraci klasického zážehového motoru a funguje na podobném principu jako benzínový motor.

Prvním definovaným společným parametrem je způsob řazení během jízdy. Elektromobil nepotřebuje složitý převod mezi rychlostními stupni, poněvadž pracuje s velkým rozsahem otáček a je schopen dosáhnout dostatečného točivého momentu již v oblasti nízkých otáček. V případě vznětových a zážehových motorů je nutná přítomnost převodovky, jelikož umožňuje prostřednictvím snižování převodového poměru dosažení vyšších rychlostí. Zákazník by mohl namítat, že v případě řazení jsou naftová a plynová vozidla s čistě elektrickým vozidlem nesrovnatelná. Proto jsem se rozhodl pro zástupce naftového a plynového pohonu zvolit automatickou převodovku.

Mezi další parametry jsem zařadil rozšířenost výbavy, rozměry vozidla a objem zavazadlového prostoru. Pro jednoduchost zmíním pouze nadstandardní položky zvolené výbavy. Všechna vozidla disponují vyhříváním sedaček, dálkovým ovládním startování a zamykacího systému a ovládacím panelem v podobě dotykové lišty. Zatímco Tesla Model 3 zmíněné položky zahrnuje v rámci pořizovací ceny, u modelů společnosti Škoda se jedná o položky, za které si běžný zákazník musí připlatit. Elektromobil díky absenci objemného motoru a převodovky v přední části karosérie nabízí nákladový prostor jak v zadní části, tak v přední části vozidla. Čistě elektrický a naftový vůz se mohou pyšnit přibližně podobným objemem zavazadlového prostoru. Na základě výrobcem uvedených údajů, objem nákladového prostoru dosahuje minimálně 600 litrů, což považuji například i pro rodinné účely za dostačující. V případě plynového agregátu Škoda Octavia část využitelného prostoru zaujímá přídatná tlaková nádrž, což zapříčiní snížení užitého prostoru přibližně o 100 litrů. Rozměry vozidel jsou téměř identické, liší se maximálně v řádech desetin metru. Při řízení a parkování není majitel vozidla nijak zvýhodněn, respektive znevýhodněn, ani u jedné z variant výběru.

2.1 Škoda Octavia 2,0 TDI

Model Škoda Octavia je řazen do kategorie nižší střední třídy s pohonem předních kol. Vozidlo je poháněno vznětovým čtyřválcovým motorem přepínaným turbodmychadlem o objemu 1,5 litru. Vozidlo je schopné vyvinout výkon 148 koní a točivý moment až 340 Nm. Výkon je přenášen na přední kola pomocí sedmistupňové automatické převodovky. Navzdory absenci trakčních baterií nebo přidavných nádrží se jedná o nejtěžší auto z výběru. Pořizovací cena je určena jak typem a výkonem motoru, tak zvolenou výbavou. Příplatková výbava Style nabízí navíc oproti základní výbavě vyhřívání sedadel, dvouzónovou klimatizaci, světelný a dešťový senzor, úložný prostor navíc v přední části interiéru vozidla, přičemž prostorná karoserie dovoluje pohodlné sezení dospělých osob i na zadních sedadlech. Dle oficiálního konfigurátoru Škoda Auto, platného od 3.3.2022, je automobil ceněn na 789 900 Kč. [3]



Obrázek 1: Model Škoda Octavia (2,0 TDI) [4]

Tabulka 1: Technické parametry vozidla [3]

Motor	
Charakteristika	2,0 TDI, vznětový
Počet válců/ objem	4/1968 cm ³
Maximální výkon	110 kW
Maximální točivý moment	340 Nm
Druh paliva	Nafta
Technické specifikace	
Hmotnost	1 960 kg
Spotřeba (WLTP)	4,2-4,7 l/100 km
Emise CO ₂ (WLTP)	111,4-122 g/km
Převodovka	Automatická, sedmistupňová
Objem palivové nádrže	45 l
Cena	789 900 Kč

2.2 Škoda Octavia 1,5 TGI

Model Škoda Octavia G-Tec je řazen do kategorie nižší střední třídy s pohonem předních kol. Pohon předních kol se vyskytuje u drtivé většiny plynových aut, protože v oblasti, umístění zadního diferenciálu a poloosy, se vyskytují nádrže. Výkon je přenášen na přední kola pomocí sedmistupňové automatické převodovky. Vozidlo je poháněno spalovací čtyřválcovým motorem přeplňovaným turbodmychadlem o objemu 1,5 litru. Ačkoliv se jízdními vlastnostmi příliš neliší od naftového agregátu, maximální dosažitelný výkon je menší a zavazadlový prostor méně prostorný. Model obsahuje nouzovou benzínovou nádrž paliva o objemu 9 litrů spolu se třemi nádržemi na CNG s celkovou kapacitou 17,33 kg. Nouzová nádrž slouží k prodloužení dojezdu a zajištění nezávislosti na čerpacích stanicích v případě, že by stlačený zemní plyn došel. Prodejce uvádí, že spolu s přídatnou nádrží na benzín činí celkový dojezd 700 km. Pro plynovou variantu vozidla Škoda Octavia byla opět vybrána výbava Style. Dle oficiálního konfigurátoru Škoda Auto, platného od 3.3.2022, je automobil ceněn na 749 900 Kč. [5]



Obrázek 2: Model Škoda Octavia 1,5 TGI [6]

Tabulka 2: Technické parametry vozidla [3]

Motor	
Charakteristika	1,5 TGI, zážehový
Počet válců/ objem	4/1498 cm ³
Maximální výkon	96 kW
Maximální točivý moment	200 Nm
Druh paliva	CNG/benzín
Technické specifikace	
Hmotnost	1844 kg
Spotřeba (WLTP)	5,7-6,1 m ³ /100 km
Emise CO ₂ (WLTP)	102,2-108,8 g/km
Převodovka	Automatická sedmistupňová
Objem palivové nádrže	9 l
Kapacita palivové nádrže	17,33 kg
Cena	749 900 Kč

2.3 Tesla Model 3

Tesla Model 3 je cenově nejdostupnější verze elektromobilu střední třídy automobilky Tesla. Pohon zadních kol zajišťuje synchronní elektromotor se zabudovanými permanentními magnety. Oproti klasicky používanému indukčnímu motoru disponuje větší účinností, je rozměrově menší a lehčí. Interiér je minimalistický a z velké části je tvořen dotykovým patnácti palcovým displejem. Veškerá ovládání funkcí automobilu včetně klimatizace, monitorování rychlosti a spotřeby probíhá na displeji, který plně nahrazuje klasický přístrojový štít. Vzhledem k přítomnosti trakční baterie se jedná o jedno z těžších automobilů mého výběru. Baterie je situovaná v podlaze vozu, tudíž těžiště je uloženo nízko, což je velmi přínosné během zatáčení a manévrování s vozidlem. Uváděný výkon je 258 koní s maximálním točivým momentem 420 Nm. Pro proces nabíjení je klíčovým komponentem palubní nabíječka o výkonu 11 kW, jenž je zabudovaná do karoserie vozidla. Uváděná spotřeba je 16 kWh/100 km, což při kapacitě lithium-iontového akumulátoru 60 kWh umožní dojezd až 380 kilometrů. Samotná baterie se řadí mezi nejdražší části elektromobilu. Společnost Tesla nabízí záruku, která poskytuje krytí opravy či výměny akumulátoru, která trvá po dobu osmi let nebo 160 000 kilometrů, podle toho, co nastane dříve. Zároveň garantuje, že kapacita akumulátoru zůstane po tuto dobu zachována alespoň ve výši 70 %. Údaj pořizovací ceny vozidla byl čerpán z autorizovaných stránek výrobce dne 4.3.2022. [7] [8]



Obrázek 3: Tesla Model 3 [7]

Tabulka 3: Technické parametry vozidla [7]

Motor	
Charakteristika	IPM-SynRM
Maximální výkon	192 kW
Maximální točivý moment	420 Nm
Typ pohonu	Elektrický
Akumulátor	
Charakteristika	Li-ion
Kapacita	60 kWh
Výkon palubní nabíječky	11 kW
Dojezd	380 km
Technické specifikace	
Hmotnost	1745 kg
Spotřeba (WLTP)	16 kWh/1100 km
Emise CO ₂ (WLTP)	0 g/km
Převodovka	1stupňová
Cena	1 324 900 Kč

3. Nabíjení elektromobilu

Pro pohyb vozidla je klíčový pohon a jeho palivo. Ve čtvrté kapitole se zaměřím pouze na nabíjení drátovým způsobem, při němž dochází k mechanickému spojení kontaktu elektromobilu a nabíjecí stanice. Trakční baterii je možné nabíjet několika různými způsoby, od použití klasické nebo průmyslové zásuvky, až po nabíjení prostřednictvím veřejně dostupných nabíjecích stanic. Pro majitele elektromobilu je nabíjení vozidla podobně intuitivní jako připojení standardního elektrického spotřebiče. Mezi nejpopulárnější způsob nabíjení patří neveřejné nabíjení, tedy nabíjení doma nebo v zaměstnání. Domácí způsob nabíjení nabízí určitý komfort, kdy majitele vozidla většinou neomezuje delší doba nabíjení při nižším výkonu, elektromobil se nabije nejčastěji přes noc a následně je ráno připraven k použití. Poskytovatelé elektrické energie nabízejí speciální tarify určené pro majitele elektromobilu, které umožňují levnější odběr elektřiny zejména v nočních hodinách. V případě, že člověk nemá možnost využít soukromé nebo firemní prostory k nabíjení, zbývá použití veřejně dostupných dobíjecích míst. Infrastruktura se neustále rozvíjí, stanice se nejčastěji nacházejí u větších dopravních uzlů se silným provozem a na parkovištích. Fungují na podobném principu jako síť čerpacích stanic, kdy řidič přijede, nabije, zaplatí za množství odebrané energie a může vyrazit. Doba nabíjení se značně liší, odvíjí se totiž od výkonu a typu nabíjecí stanice, výkonu palubní nabíječky a kapacity baterie. V dnešní době se neustále rozšiřuje síť rychlodobíjecích a ultrarychlých stanic, kde nabíjení zabere značně kratší dobu. Proces nabíjení lze rozdělit do tří výkonových tříd:

Tabulka 4: Výkonové třídy nabíjení [9]

	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Napěťová hladina	230 V (AC)	400 V (AC)	208-600 V (AC/DC)
Výkonová třída	$\leq 3,7\text{kW}$	3,7 – 22 kW	> 50 kW
Umístění nabíječky (počet fází)	Palubní nabíječka (1 fáze)	Palubní nabíječka (1 fáze nebo 3 fáze)	„Off board“ nabíječka (3 fáze)
Typ užití	Domácí nabíjení	Domácí nebo veřejné nabíjení	Rychlonabíjecí stanice

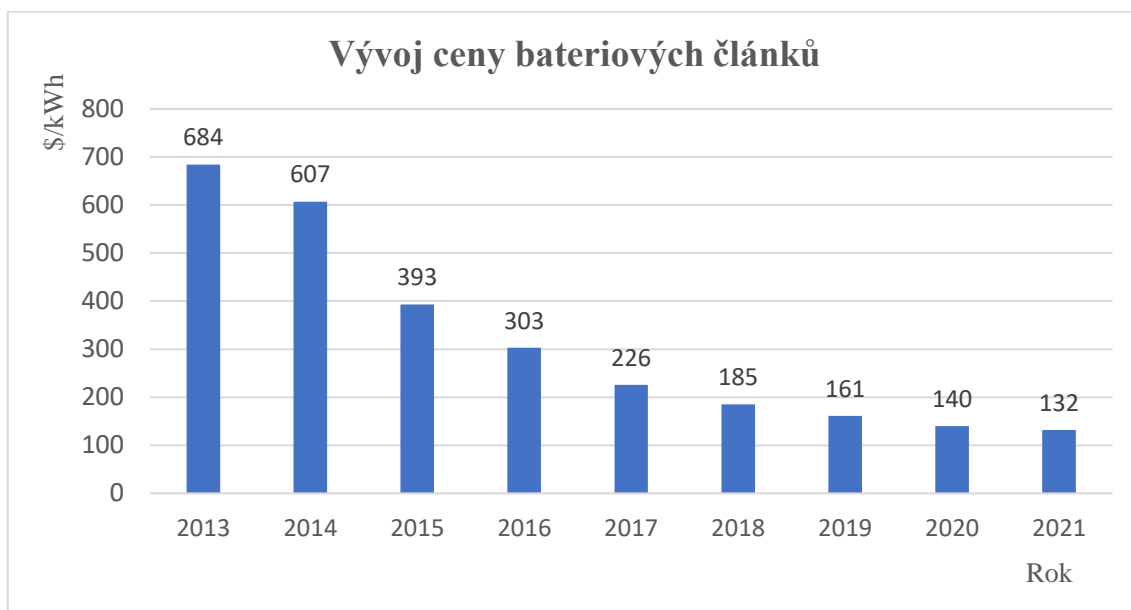
3.1 Baterie elektromobilu

Jednou z nejdůležitějších a nejdražších částí elektromobilu je trakční baterie. Lithium-iontová baterie je elektrochemické zařízení sloužící k opakované akumulaci elektrické energie. Skládá se z řádově stovek až tisíců malých bateriových článků v sériovém nebo paralelním zapojení. V následujících podkapitolách popíšu charakteristické technické parametry a cenový vývoj trakčních baterií.

Cenový vývoj trakčních baterií

Za poslední desetiletí vývoj baterií zaznamenal posun. Navzdory tomu, že k významnému technologickému průlomu nedošlo, lithium-iontová baterie je vlivem optimalizací výrobních postupů, vývojem technologií výroby a přibývajícím počtem výrobců několikanásobně levnější. Tato skutečnost přináší na trh cenově a uživatelsky atraktivnější modely elektromobilů s vyšším dojezdem v porovnání s minulostí. V odborné literatuře se uvádí cena baterie v souvislosti s kapacitou, tedy v dolarech za kWh. V příložené grafické závislosti je vyobrazen cenový vývoj trakčních baterií v reálných cenách přepočtených na rok 2021.

Graf 1: Vývoj objemově vážené cenové hladiny baterií [10]



Z grafické závislosti lze vypočítat, že v posledních letech se trend snižování cenové hladiny zpomalil. Příčinou tohoto stavu je zvýšení cen klíčových komodit a nerostů pro výrobu baterií spolu se zvýšenou poptávkou. Nastala neobvyklá situace na trhu, kdy byla celosvětová těžba a výroba omezena nebo náhle zcela přerušena. Dle nashromážděných dat a predikcí výzkumné společnosti BloombergNEF se schyluje k tomu, že v horizontu několika let cenová hladina dosáhne hranice 100 \$/ kWh, což bude mít příznivý dopad na hromadnou výrobu a konkurenceschopnost elektrických vozidel [10].

Technické parametry trakční baterie

Při každodenním provozu trakčních baterií se kladou zvýšené nároky na životnost, bezpečnost a spolehlivost. Na spolehlivý a bezpečný provoz baterie má vliv nespočet faktorů, ať už elektrických, konstrukčních nebo chemických.

Mezi klíčové parametry baterie patří zejména výkon, vnitřní odpor, kapacita baterie, hustota energie a provozní teplota. Vnitřní odpor je veličina ovlivňující maximální výkon, který můžeme ze zdroje čerpat. Ideální baterie má dle definice vnitřní odpor nulový. V reálném provozu se však postupem času vlivem degradace elektrochemické součástky vnitřní odpor zvyšuje, což vede ke zvýšení ztrátového výkonu. To má za následek snížení pracovního výkonu baterie. Výkon baterie, udáván v kW, určuje maximální dobíjecí a nabíjecí výkon. Kapacita baterie, udávána v kWh, vyjadřuje množství elektrické energie, kterou je baterie schopná uskladnit. Hustota energie určuje množství uložené energie ve vztahu k hmotnosti, jednotkou veličiny je tedy Wh/kg. Z rozměru veličiny vyplývá, že čím je vyšší hodnota hustoty, tím se jedná o vhodnější baterii k trakčním účelům.

Potenciálním problémem baterií jsou teplotní výkyvy, ať už způsobené provozem nebo okolním prostředím. Jak už již bylo popsáno, zvyšování vnitřního odporu baterie se projevuje zvýšenými ztrátami, které vedou také k tepelnému namáhání součástky. Je proto nutné zavést určitou formu aktivního chlazení baterie. Naopak při nízkých teplotách je pro optimální provoz a průběh chemických reakcí uvnitř baterie nutné zahřívání. Teplota 25 °C se považuje za optimální a cíleně udržovanou pracovní teplotu lithium-iontové baterie. [11]

Životnost trakční baterie

Jako každé zařízení, podléhá i lithium-iontová baterie procesu stárnutí a postupného opotřebení. Snižování životnosti baterie se odvíjí od několika faktorů a jedná se o problematiku velice komplexní.

V klidové stavu, kdy baterie není přímo využívána, dochází k samovolné degradaci vlivem času. Hlavní parametry zodpovědné za předčasný stárnutí jsou teplota a stav nabití bateriového článku. V provozním stavu je životnost ovlivněna zejména pracovní teplotou, počtem provedených nabíjecích cyklů, velikostí nabíjecích a vybíjecích proudů a dynamikou jízdy [11]. Baterie je v ideálním případě konstruována takovým způsobem, aby vydržela po celou dobu životnosti vozidla. Skutečnost může být odlišná, jelikož se většinou jedná ze strany výrobce o kompromis mezi kapacitou, hmotností, velikostí a cenou. Automobilové společnosti však nabízí zákazníkům záruky, zajišťující výměnu nebo opravu předčasně poškozené baterie.

Kapacita baterie se s rostoucí životností snižuje a nesprávný způsob nabíjení může proces ještě urychlit. Pro nejdélší životnost baterie je doporučováno pomalejší střídavé nabíjení na denní bázi, rychlé nabíjení je ideální pro delší a plánované cesty. Baterii je možné napájet pouze prostřednictvím stejnosměrného proudu. Odlišnost mezi střídavým a stejnosměrným nabíjením tvoří místo přeměny jednoho typu elektrického proudu na druhý. Transformace napětí probíhá v zařízení uvnitř vozidla „On Board Charger“ nebo uvnitř nabíjecí stanice „Off Board Charger“. Zmíněné pojmy a způsoby nabíjení blíže charakterizují v následující kapitole.

3.2 Střídavé nabíjení

Během nabíjení je elektromobil připojen k síti střídavého napětí a k transformaci na stejnosměrný nabíjecí proud dochází uvnitř palubní nabíječky („On-Board Charger“), která umožňuje kontrolu nabíjecího výkonu, tím zajišťuje bezpečnost a šetrnost nabíjecího procesu. Dimenzovaný výkon palubních nabíječek se pohybuje v rozmezí od 3,6 kW do 22 kW. Palubní nabíječky s vyšším výkonem jsou součástí převážně dražších a rozměrově větších elektrických automobilů. Rychlost nabíjení závisí zejména na velikosti, výkonu palubní nabíječky a na proudovém omezení sítě. Střídavé nabíjení zabere minimálně několik hodin, proto se jedná o ideální způsob nabíjení, pokud je člověk doma nebo celý den v práci.

3.2.1 Nabíjecí konektory

Konektory určené ke střídavému nabíjení obecně obsahují minimálně dva nabíjecí kolíky, jejichž počet se odvíjí od počtu nabíjecích fází, a zbylé se rozlišují na řídicí a ochranné. Řídicí kolíky lze rozdělit na dva typy, Control pilot a Proximity pilot. Control pilot zajišťuje komunikaci vozidla s nabíjecí soustavou a Proximity pilot kontroluje, zda bylo dosaženo správného připojení konektoru k vozidlu. Celosvětově jsou používány 3 varianty střídavých konektorů:

Typ 1 - Yazaki (SAE J1772)

Tento typ je dominantní především na japonském a americkém trhu. Konektor umožňuje využít jednu fázi s maximální dobíjecím výkonem 7,4 kW (230 V/ 32 A). Sestává z pěti kolíkového systému, přičemž dva kolíky jsou nabíjecí, jeden zemnicí a dva řídicí. [12]



Obrázek 4: Typ 1 (J1772) [13]

Typ 2 - Mennekes (IEC 62196)

Nejrozšířenějším evropským standardem pro střídavé dobíjení jsou konektory Mennekes. Byly vyrobeny pro účel nahrazení J1772 konektorů stejnojmenným německým výrobcem Mennekes. Konektor nabíjí přes všechny tři fáze s maximálním dobíjecím výkonem až 43 kW (400 V/ 63 A). Konektor sestává ze sedmi kolíků, přičemž tři kolíky jsou nabíjecí, dva zemní a dva řídicí. [12]



Obrázek 5: Typ 2 Mennekes [14]

GB/T Standard

Na čínském trhu je používán pouze jeden konektor GB/T standard. Jedná se o sedmikolíkovaný konektor. Od konektoru typu 2 se liší pouze v pořadí uspořádání jednotlivých vodičů a ochran.



Obrázek 6: GB/T [14]

3.2.2 Simulace nabíjení vozu Tesla Model 3

V této podkapitole se pokusím nastínit typy konektorů, které jsou kompatibilní s vozem Tesla Model 3. Na rozdíl od jiných automobilových společností používá Tesla pro stejnosměrné a střídavé typy nabíjení na území USA stejný konektor. Společnost tak zvýhodňuje své zákazníky, protože na

vlastních stanicích je schopen nabíjet pouze řidič vlastní vůz značky Tesla. Konektor sestává z pěti kolíků, přičemž dva jsou řídicí, jeden zemnicí a dva nabíjecí.



Obrázek 7: Tesla US konektor [14]

Jednofázové nabíjení je možné realizovat pouze jako záložní řešení prostřednictvím mobilní nabíječky Tesla. Nabíjení pomocí konektoru typu 1 není kompatibilní s vozem Tesly, ale pro představu, doba nabíjení o výkonu 7,4 kW zabere přibližně devět hodin. Se zakoupeným vozem zákazník obdrží kabel typu 2, který umožňuje nabíjení za použití veřejné infrastruktury. Rychlost střídavého nabíjení přímo závisí na velikosti a dimenzovaném výkonu palubní nabíječky. V případě vozidla Tesla Model 3 je palubní nabíječka dimenzována na maximální nabíjecí výkon 11 kW, což znamená, že při vyšším výkonu 22 kW je doba dobíjení identická. Uvedené časy nabíjení představují dobu, za kterou se plně vybitá baterie nabije na plnou kapacitu. [7]

Tabulka 5: Přehled možností střídavého nabíjení Tesla Model 3 [7]

Typ konektoru	Nabíjecí parametry	Nabíjecí výkon	Doba dobíjení
Klasická zásuvka	230 V/ 1x10 A	2,3 kW	29 hodin a 15 minut
Mobilní nabíječka Tesla	230 V/1x16 A	3,7 kW	18 hodin a 15 minut
Typ 2 (Mennekes)	400 V/ 3x16 A	11 kW	6 hodin a 15 minut
Typ 2 (Mennekes)	400 V/ 3x32 A	22 kW	6 hodin a 15 minut

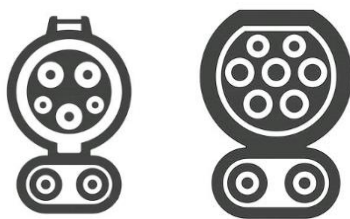
3.3 Stejnsměrné nabíjení

Během stejnosměrného dobíjení transformace síťového střídavého napětí probíhá uvnitř dobíjecí stanice („Off Board Charger“). Zařízení není hmotnostně ani rozměrově tolik omezeno, jak tomu bylo u palubní nabíječky, proto lze dimenzovat na vyšší výkony. Dimenzovaný výkon nabíjecí stanice se pohybuje v rozmezí 50–350 kW. Vzhledem k tomu, že je trakční baterie nabíjena přímo, je zcela zásadní komunikace nabíjecí stanice se systémem BMS (Battery Management System). BMS kontroluje parametry napětí a proudu a řídí výkonové a ochranné obvody v případě krizových stavů. Při rychlém dobíjení je zapotřebí vysokého proudu a výkonu, které přímo ovlivňují životnost baterie, a proto se nedoporučuje dobíjet na denní bázi.

3.3.1 Nabíjecí konektory

Typ 1 a Typ 2 (CCS-Combined Charging System)

V dnešní době se jedná o nejpoužívanější způsob stejnosměrného nabíjení. Ve Spojených státech se používá konektor CCS typu 1, zatímco v Evropě se používá zejména konektor CCS typu 2. Výhodou použití kombinovaného nabíjecího systému CCS je, že umožňuje stejnosměrné i střídavé nabíjení. Jedná se totiž o původní zpracování konektoru typu 1 a typu 2, doplněné o dolní část určenou ke stejnosměrné nabíjení. Maximální nabíjecí výkon je 170 kW. [12]



Obrázek 8: CCS Typ 1 (vlevo), CCS Typ 2 (vpravo) [14]

CHAdeMO

Konektor vyroben v Japonsku, ačkoliv tuto technologii využívají především asijsí výrobci, jedná se o celosvětově používaný pro stejnosměrný typ nabíjení. Název CHAdeMO je odvozen z fráze „CHArge de MOve“, což v překladu znamená „nabíjení pro pohyb“.



Obrázek 9: CHAdeMO [14]

GB/T Standard

Stejně jako v oblasti střídavého nabíjení má Čína vlastní standard také pro stejnosměrné nabíjení.



Obrázek 10: GB/T standard [14]

3.3.2 Simulace nabíjení vozu Tesla Model 3

Tesla používá pro stejnosměrné a střídavé typy nabíjení na území USA stejný konektor. V Evropě ale není nutné používat adaptér, jelikož se společnost přiklonila ke konektoru CCS Typu 2 a prohlásila ho za evropský standard. Na území Evropy jsou vybudovány ultrarychlé stanice, zvané Supercharger, které mohou využívat exkluzivně majitelé vozu Tesla. Na základě výkonových hladin se zpravidla rozlišují dva typy Supercharger stanic. Supercharger v2 má dimenzovaný maximální výkon 150 kW, kdežto novější verze Supercharger v3 disponuje maximálním výkonem 250 kW. Skutečnost, že existují stanice o vyšších nabíjecích výkonech, ale neznamená, že automobil lze nabít za 10 minut. Pořád musíme brát v úvahu nejcitlivější bod nabíjecího procesu, čímž je trakční baterie. Pro šetrnost nabíjení a zachování co nejdelší životnosti baterie je pro Tesla Model 3 doporučen maximální výkon rychlonabíjení 170 kW. Vzhledem k vysokým nabíjecím proudům se pro ochranu baterie doporučuje

nepřekročovat úroveň nabití akumulátoru nad 80 %. Uvedené časy v tabulce proto představují dobu potřebnou k dobití pouze do zmíněné kapacity. [7]

Tabulka 6: Přehled možností stejnosměrného nabíjení Tesla Model 3 [7]

Typ konektoru	Nabíjecí proud	Maximální výkon	Doba dobíjení
CCS Combo Typ 2	125 A	50 kW	56 minut
CCS Combo Typ 2	400 A	150 kW	27 minut
Supercharger v3	500 A	250 kW	25 minut

4. Modelové použití vozidel

Při výběru nového automobilu je zcela klíčové vyhodnotit, jak a k čemu bude člověk vozidlo užívat. Majitel rodinného vozidla má zcela jiné nároky v porovnání s někým, kdo hodlá vozidlo použít například pro firemní účely. V řadě zemí Evropské unie se v rámci podpory rozvoje elektromobility může zákazník těšit z dotace či určité formy zvýhodnění. V České republice to tak není, fyzickým osobám nejsou nabízeny žádné formy dotace nebo případné vnější motivace k pořízení elektromobilu. Ve své práci jsem zvolil modelovou situaci, kdy všichni majitelé vozidel jsou fyzické osoby.

Pro účely práce jsem určil tři modelové příklady s různým ročním nájездem a životní situací. Plynový agregát disponuje vznětovým motorem poháněným stlačeným zemním plynem a benzínem. Z hlediska provozu, doplnění paliva a údržby se v porovnání s konvenčním pohonem příliš neliší. Jedním ze základních odlišovacích znaků definovaných rodin je způsob nabíjení čistě elektrického vozidla. U něj jsem zvolil tři základní scénáře: čistě domácí nabíjení, kombinace veřejného a firemního nabíjení a kombinaci domácího nabíjení s dodatečným veřejným dobíjením.

Jedním z klíčových parametrů zhodnocení provozu je uvažovaná životnost vozidla. Definované rodiny automobil využívají téměř denně a jsou na silniční dopravě závislé. Z toho důvodu je potřeba určit přiměřenou životnost, po kterou je automobil schopen bezproblémového a spolehlivého provozu. Tato průměrná životnost vozidla se dle výrobců pohybuje v rozmezí 200 000 až 300 000 kilometrů. Navzdory tomu, že se jedná pouze o průměrný údaj, pro účely práce ho budu považovat jako směrodatný a za horní hranici nájězdu označím právě 300 000 kilometrů. Velmi diskutovanou součástí elektromobilu ve vztahu k délce využití vozidla je trakční baterie. V roční zprávě o působení společnosti Tesla za rok 2020 byla uvedena křivka degradace baterie elektromobilu v závislosti na ujeté vzdálenosti. Na základě dostupných dat společnost uvádí, že průměrná Tesla baterie sníží svou kapacitu při nájězdu 32 000 kilometrů zhruba o jedno procento. To znamená, že při najeté vzdálenosti 322 000 kilometrů dochází přibližně ke snížení původní kapacity pouze o 10 %, přičemž se výměna baterie doporučuje při poklesu pod hranici 80 % původní kapacity [17]. Tato skutečnost je pro uživatele velice příznivá a naznačuje, že si baterie zachová dostatečnou část kapacity po celou dobu životnosti vozidla. Je ale nutné připomenout, že se reálná situace za různých podmínek může lišit. V dokumentu nebyly navíc uvedeny statistiky týkající se vozidla Tesla Model 3, ale pouze Tesla Model S a X. Jedním z důvodů je to, že se jedná o nově uvedený model a v současné době není k dispozici dostatečné množství dat. Na základě publikovaných dat budu v rámci simulace provozu ve většině případů počítat s tím, že baterie vydrží po celou dobu životnosti automobilu, jelikož celkový nájезд rodin nepřesáhne horní hranici 300 000 kilometrů. Zbývající klíčové parametry pro výpočet ekonomické efektivity budou charakterizovány v páté kapitole, zkoumající ekonomickou stránku jednotlivých variant provozu.

Pro zjednodušení a zanedbání možných cenových rozdílů během výpočtu budu uvažovat jednotný věk majitele vozidla spolu s havarijní historií. Zmíněné parametry mají přímý vliv na havarijní pojištění a povinné ručení, které jsou součástí provozních nákladů.

4.1 Referenční rodina A

Prvním scénářem je rodina bydlící v rodinném domě s průměrným ročním nájездem 20 000 kilometrů. Většina každodenních tras tvoří doprava dětí do školy a cesty do práce. Vzhledem k možnosti nabíjení elektromobilu v garážovém prostoru budovy a relativně nízkého denního nájězdu jsem definoval předpoklad, že si rodina vystačí čistě s domácím dobíjením. Příležitostné potřeby využití veřejné dobíjecí infrastruktury zanedbám, jelikož se jedná o ideální scénář provozu bez dlouhých cest například do zahraničí. Ve vztahu k životnosti baterie nabízí společnost Tesla záruku pokrývající osm

let provozu spolu se 160 000 kilometry nájezdu. V tomto směru bude trakční baterie po celý provoz elektromobilu v záruce.

Tabulka 7: Shrnutí parametrů referenční rodiny A

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Rodinný dům, vesnice
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	20 000 km
Délka využití vozidla	8 let
Celkový nájezd	160 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Domácí
Výměna baterie elektromobilu	Ne

4.2 Referenční rodina B

Druhý scénář popisuje manželský pár bydlící v činžovním domě na sídlišti s průměrným ročním nájezdem 30 000 kilometrů. Manžel je vedoucí oddělení, auto používá většinou pro pracovní účely, případně jako dopravu na pracovní schůzky po opakujících se trasách. Podstatná část cest se uskutečňuje zejména v okolí hlavního města Prahy. Z toho důvodu se budu také věnovat možnosti využití zvýhodněného parkování. Praha je v současnosti jedinou lokalitou, která nabízí parkování zdarma pro vozidla splňující stanovené emisní normy. Vzhledem k definovanému charakteru bydliště je majitel elektromobilu odkázán pouze na využití firemních a veřejných dobíjecích prostor. V tomto směru jsem se rozhodl procentuální zastoupení jednotlivých způsobů nabíjení určit v poměru: 40 % případů tvoří firemní nabíjení a 60 % představuje využití veřejně dostupných dobíjecích bodů. Poměr je pouze orientační, v rámci citlivostní analýzy budu testovat vliv změny poměru na výsledné provozní náklady automobilu.

Při použití elektromobilu nastává menší přesah slibované záruky vztahující se k trakční baterii. Nicméně jak jsem již popsal v úvodní části kapitoly, v práci budu předpokládat, že jednotlivé komponenty automobilu vydrží bez markantní závady a nutnosti výměny po celou dobu své predikované životnosti.

Tabulka 8: Shrnutí definovaných parametrů referenční rodiny B

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Byt, městská oblast
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	30 000 km
Délka využití vozidla	8 let
Celkový nájezd	240 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Veřejný (40 %) + firemní (60 %)
Výměna baterie elektromobilu	Ne

4.3 Referenční rodina C

Poslední scénář představuje rodinu bydlící v rodinném domě s ročním nájezdem 60 000 kilometrů. Cílem modelu je simulace vysokého ročního nájezdu zaměstnance realitní kanceláře, který cestuje po celé České republice. Navzdory tomu, že rodinný dům disponuje možností využití garážového prostoru za účelem domácího nabíjení, kvůli dlouhým trasám je potřeba přejít ke kombinaci s veřejným způsobem nabíjení. V tomto směru jsem se rozhodl procentuální zastoupení určit v poměru: 60 % případů veřejné nabíjení a 40 % domácí nabíjení. Přihlédneme-li k charakteru povolání a nepravidelným denním trasám, pro řidiče je dostupnost čerpacích a dobíjecích stanic klíčová.

Vzhledem k vysokému ročnímu nájezdu jsem se rozhodl pro redukci délky vlastnictví vozidla, a to do výše pěti let. V předchozích modelech předpokládám využití elektromobilu bez výměny baterie. V reálném provozu je potřeba také brát v potaz, že majitel elektromobilu může jezdit například v zimním období náročnějším terénem při nízkých teplotách, což má jistý negativní vliv na životnost baterie ve srovnání s nájezdem po běžných silnicích. Proto jsem se rozhodl ve vztahu k třetímu modelu provozu s nejvyšším ročním nájezdem uvažovat dva provozní scénáře elektromobilu. První označím jako „optimistický“ scénář, kdy do konce uvažované doby provozu bude zachována dostatečná kapacita baterie k trakčním účelům. Za tzv. „pesimistický“ scénář označím situaci, kdy bude zapotřebí nutná výměna baterie hrazená z rodinného rozpočtu, jelikož došlo k překročení kilometrového limitu záruky. Detailnější popis a ocenění problematiky provedu v kapitole 5.4.1 Servisní náklady.

Tabulka 9: Shrnutí definovaných parametrů referenční rodiny C

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Rodinný dům
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	60 000 km
Délka využití vozidla	5 let
Celkový nájezd	300 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Domácí (40 %) + veřejné (60 %)
Výměna baterie elektromobilu	Ano

5. Porovnání ekonomických parametrů vozidel

V páté kapitole se věnuji porovnání ekonomických parametrů jednotlivých druhů vozidel v reálném provozu. Vstupním výdajem je výše pořizovací ceny automobilu, na kterou klade zákazník zpravidla velký důraz. Nejde však vždy nutně o největší položku. Při provozu automobilu jsou také určující celkové palivové náklady, průběžné servisní náklady, pojištění a jiné poplatky. Automobil je jedna z největších životních investic, jelikož pořizovací a provozní náklady mají úzkou vazbu na výdajovou stránku rozpočtu majitele. Proto je zásadní zvažovat koupi z různých úhlů pohledu.

Pro výpočet a určení kritérií efektivnosti investice je klíčová výše diskontní míry. Diskontní míra zahrnuje časovou hodnotu peněz a reprezentuje požadovanou míru návratnosti. Mezi základní faktory ovlivňující výši diskontní sazby patří návratnost kapitálu, riziko a inflační míra [18]. Hodnota průměrné roční inflace za rok 2020 se podle Českého statistického úřadu pohybuje okolo 3,2 %, nicméně v rámci výpočtu budu vycházet z teoreticky udržitelné hodnoty inflace ve výši 2 % [19]. Dalším určujícím faktorem je výnosnost kapitálu. Výnosnost kapitálu je dána potenciálním ušlým přínosem z ušlé příležitosti, tzv. opportunity cost. Budu uvažovat, že středně příjmová rodina bude peníze investovat například do akciových fondů se střední mírou rizikovosti. Očekávaná míra zhodnocení je přibližně 6 % se zahrnutím inflace. Tento procentuální údaj označím jako diskontní míru referenční rodiny A a C. V pozici vedoucího oddělení firmy je možné kapitál investovat přímo do firmy, například na zlepšení firemního vybavení, nákupu novější tiskárny nebo rychlejších firemních počítačů pro celkové zlepšení a zpříjemnění pracovní činnosti zaměstnancům. Očekávaný výnos bude sice vyšší, ale s vyšší mírou rizika. Očekávanou míru zhodnocení budu v takovém případě uvažovat jako 8 % se zahrnutím inflace, přičemž procentuální údaj označím jako diskontní míru referenční rodiny B.

NPV (Net Present Value) je suma diskontovaných peněžních toků generovaných během celé doby životnosti investice. Jelikož ve své práci hodnotím pouze náklady spojené s provozem a pořízením automobilu, nikoliv zisk, budu uvažovat hotovostní toky pouze nákladové. To znamená, že za výhodnější variantu bude označena ta s nejnižší hodnotou NPV.

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+r)^{-t} + INV \quad (1)$$

, kde

T je doba životnosti investice

CF_t je hotovostní tok v čase t

r je diskontní míra

INV je počáteční investice

Roční ekvivalentní peněžní tok je nástroj pro zhodnocení investic s různou dobou životnosti. Jedná se o kritérium NPV vynásobené anuitním faktorem. Anuitní faktor závisí na výši diskontu a na době životnosti investice. Výhodou zavedením kritéria RCF je rovnoměrné rozdělení všech diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let za předpokladu cyklického opakování ekonomických důsledků a konstantní diskontní míru během doby porovnání.

$$RCF = a \cdot NPV = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \cdot NPV \quad (2)$$

, kde

a je anuita

r je diskont

T je doba životnosti investice

NPV je čistá současná hodnota investice

5.1 Pořizovací cena vozidla

Pořizovací cena vozidla je z velké části určena typem pohonu, vlastnostmi motoru a rozšířeností výbavy. Určitou roli však také hraje barva karosérie nebo oblíbenost dané značky či modelu. V řadě zemích Evropské unie se v rámci podpory rozvoje elektromobility může zákazník těšit z dotace či určité formy zvýhodnění, ať už při koupi nebo provozu elektrického vozidla. Ačkoliv se míra podpory napříč státy velmi liší, jen hrstka členských států EU nepodporuje rozvoj elektromobility v žádném rozsahu. Česká republika v současné době nenabízí žádnou formu cenového zvýhodnění při koupi automobilu pro fyzické osoby. Z toho důvodu budu vycházet z ceny uvedené výrobcem.

V případě pořízení elektromobilu jsem uvažoval investici do wallboxu, jenž značně usnadňuje domácí nabíjení. Wallbox, v překladu nástěnná nabíjecí stanice, sice nabízí podobné nabíjecí parametry jako průmyslová třífázová zásuvka, ale mezi hlavní výhody patří sledování spotřeby, řízení výkonu a podpora režimu 3, který zajišťuje komunikaci o průběhu nabíjení wallboxu s vozidlem. Na základě zmíněných důvodů si dovoluji wallbox označit jako nutnou součást domácího nabíjení. Pro nákup správného zařízení je nutné si nejprve definovat nabíjecí parametry. Tesla Model 3 Long Range obsahuje palubní nabíječku s dimenzovaným výkonem 11 kW, což definuje maximální nabíjecí výkon a rychlost nabíjení. Během výpočtu budu uvažovat instalaci Wallboxu GLB o nastavitelném výkonu v rozmezí 3,7 kW – 22 kW za cenu 24 188 Kč. Nastavitelná hladina výkonu může být výhodná v případě, že rodina bude vlastnit větší počet elektromobilů, případně pořídí další vozidlo s palubní nabíječkou o výkonu 22 kW. Samotnou nabíjecí stanici Wallbox je nutné umístit na zeď v garážovém prostoru. Pro bezproblémový průběh nabíjecího procesu je nutné zainvestovat do zpevnění zdi a úpravy garážového prostoru. Tento náklad jsem ocenil spolu s cenou montáže kvalifikovaným pracovníkem na 7 000 Kč.

Pro domácí dobíjení je nutné mít dostatečný rezervovaný příkon. Při nedostatečné hodnotě rezervovaného příkonu hlavního jističe by domácnost musela udržovat obezřetnost v době nabíjení elektromobilu. Například by nemohlo docházet současně k provozu spotřebičů s velkým odběrem (pračka, myčka, sušička apod.). Budu tedy počítat s tím, že rodiny bydlící v rodinném domě mají dimenzovaný jistič na hodnotu 3x32 A, což pro noční nabíjení považuji za více než dostačující.

Tabulka 10: Náklady spojené s pořízením nabíjecí stanice Wallbox

Diskont 6 %	Cena	Životnost	Roční ekvivalentní náklady
Cena zařízení	24 188 Kč	10 let	3 286 Kč
Úprava garáže	7000 Kč	20 let	610 Kč
Celkem			3 897 Kč

5.2 Prodej vozidla

Automobily uvažuji zcela nové a nepoužité, tudíž nepředpokládám závažné poruchy v důsledku opotřebení nebo špatné údržby předešlým majitelem. Z toho důvodu se nabízí možnost prodeje vozidla po ukončení doby použití. Predikce ocenění vozidla na základě definovaného nájezdu a stáří vozidla je ze své podstaty nejistou záležitostí. Záleží na aktuální tržní situaci, stavu jednotlivých komponentů,

druhu konkrétního modelu a motoru, v případě elektromobilu také na stavu baterie. Všechny vyjmenované faktory mají přímý vliv ať už na snížení nebo zvýšení prodejní ceny automobilu. Standardním postupem odhadu prodejní ceny vozidla je provedení kilometrové korekce, analýzy trhu a zohlednění stáří automobilu, což determinuje výslednou hodnotu. Ocenění výběru vozidel je možné provést prostřednictvím elektronicky dostupných srovnávačů nebo kontaktováním odborníka na obchod s ojetými vozidly.

Osobně jsem se vydal cestou elektronicky dostupných srovnávačů, které jsou schopny na základě analýzy trhu se srovnatelnými vozy určit orientační hodnotu modelu. Největší problém však nastal při odhadu tržní ceny ojetého elektromobilu, konkrétně vozu Tesla Model 3. V České republice je počet elektromobilů totiž výrazně nižší a technologie čistě elektrického pohonu není na trhu s ojetými vozidly častá. Tato skutečnost vede k tomu, že autobazary a výpočetní algoritmy nemají s elektromobilitou tolik zkušeností. Cenovou hladinu elektromobilu z velké části determinuje aktuální stav baterie, což se dá považovat za další těžce odhadnutelný parametr přispívající k výslednému výpočtu ceny. Záleží totiž na mnoha faktorech, od způsobu nabíjení, počtu nabíjecích cyklů až po zacházení s vozidlem (viz kapitola 3.1). Součástí kontroly stavu použitého vozidla je v případě elektromobilu test kapacity a zdraví baterie. Jelikož v případě elektromobilu není možné použít výpočetní algoritmus, je nutné provést osobní odhad na základě dostupných inzerátů a statistik. Při odhadu kapacity použité baterie vycházím z předpokladu zmíněného v úvodu čtvrté kapitoly, kde se odkazují na roční zprávu společnosti Tesla za rok 2020. Zde byla uvedena křivka degradace baterie elektromobilu v závislosti na ujeté vzdálenosti. Společnost uvádí, že při najeté vzdálenosti 322 000 kilometrů dochází ke snížení původní kapacity přibližně o 10 %, přičemž se výměna baterie doporučuje při poklesu pod hranici 80 % původní kapacity [17]. V případě referenčních rodin A a B proto považují kapacitu baterie pro budoucího majitele za dostatečnou. Samozřejmě s vyšším nájездem je degradace vyšší, proto také prodejní hodnota elektromobilu s rostoucím ročním nájездem klesá. Naopak u referenční rodiny C nastává vyšší pravděpodobnost nutné výměny. Z toho důvodu je navzdory nižšímu stáří vozidel v porovnání s předchozími modely odhad tržní ceny optimistického scénáře nižší. Vzhledem k tomu, že pesimistický scénář uvažuje výměnu baterie ve čtvrtém roce provozu vozidla, novému majiteli je nabízen elektromobil s rok starou trakční baterií. Tato skutečnost implikuje vyšší hodnotu ojetého vozidla.

Cenové hladiny vycházejí z aktuální situace na trhu ojetých vozidel a spolu s klíčovými parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11: Odhad tržní ceny ojetých vozidel

Referenční rodina C						
Model		Stav tachometru	Stáří vozidla	Motorizace	Výkon	Odhad tržní ceny
Škoda Octavia 2,0 TDI		300 000 km	5 let	2,0 TDI	110 kW	360 000
Tesla model 3	Optimistický			Elektromotor	192 kW	390 000
	Pesimistický			Elektromotor	192 kW	600 000
Škoda Octavia 1,5 TGI						1,5 TGI

Tabulka 12: Odhad tržní ceny ojetých vozidel

Referenční rodina A					
Model	Stav tachometru	Stáří vozidla	Motorizace	Výkon	Odhad tržní ceny
Škoda Octavia 2,0 TDI	160 000 km	8 let	2,0 TDI	110 kW	277 000
Tesla model 3			Elektromotor	192 kW	450 000
Škoda Octavia 1,5 TGI			1,5 TGI	95 kW	252 000
Referenční rodina B					
Model	Stav tachometru	Stáří vozidla	Motorizace	Výkon	Odhad tržní ceny
Škoda Octavia 2,0 TDI	240 000 km	8 let	2,0 TDI	110 kW	255 000
Tesla model 3			Elektromotor	192 kW	400 000
Škoda Octavia 1,5 TGI			1,5 TGI	95 kW	226 000

5.3 Palivové náklady

Jednu z cenově nejviditelnějších položek nákladů na provoz automobilu tvoří palivové náklady. Průměrná spotřeba vozidla je sice uváděna výrobcem, avšak od hodnot z reálného provozu se může lišit. Skutečná spotřeba závisí na mnoha různých faktorech. Lze mezi ně zařadit pokročilost jízdních schopností a jízdní styl řidiče, kvalitu cest nebo stav vozidla. V případě elektromobilu se spolu s uvedenými faktory musí také uvažovat celková spotřeba elektrické energie automobilu (klimatizace, vyhřívání sedaček, reproduktory a podobně). Provoz elektromobilů je výhodný zejména ve městě v rámci neplynulé jízdy, kde se častěji uplatní systém rekuperace, který přispívá ke snížení spotřeby a prodloužení dojezdu.

V rámci výpočtů budu uvažovat průměrnou spotřebu uvedenou výrobcem, roční nájezd automobilu a aktuální cenu pohonné hmoty. Vzhledem k tomu, že se ceny pohonných hmot vybraných automobilů neustále mění, nepostačí do výpočtu zahrnout pouze míru inflace. Pro odhad časové změny cen jednotlivých pohonných hmot jsem se rozhodl do výpočtu zahrnout průměrnou míru růstu cen, která popisuje rozdíl mezi dvěma hodnotami v určitém časovém období. Když výsledek vynásobíme stem, obdržíme údaj v procentech.

$$\text{průměrná roční míra růstu} = \sqrt[n]{\frac{\text{současná hodnota}}{\text{počáteční hodnota}}} - 1 \quad (3)$$

, kde n je počet časových období.

Celkové roční palivové náklady lze určit pomocí znalosti spotřeby vozidla, roční ujeté vzdálenosti a na základě aktuální ceny pohonných hmot. Do výpočtu jsem zahrnul i průměrnou hodnotu ročního růstu, jelikož odhaduji, že se cena bude časem lišit.

$$\text{roční palivové náklady} = \frac{s}{100} \cdot c_{PHM} \cdot v \cdot r \quad (4)$$

, kde

v je ujetá vzdálenost v km

c_{PHM} je aktuální cena pohonných hmot

s je kombinovaná spotřeba uvedená výrobcem

r je míra ročního růstu

5.3.1 Škoda Octavia 2,0 TDI

Cenová hladina nafty je ovlivněna celkovým vývojem cen ve světě, výší spotřební daně a sezónními výkyvy, které mají za následek změny poptávky a nabídky. Výsledná cena je také ovlivněna tržními faktory. Zde řadíme míru marže obchodníků a distributorů, velkoobchodní cenu paliva, náklady na rafinaci, aktuální složení nafty a podobně. Zmíněné tržní faktory tvoří rozdílovou částku jednotlivých čerpacích stanic. Při výpočtu budu vycházet z průměrných cen za litr naftového paliva letech 2011-2022 uvedených v následující tabulce. Uvedená cenová hladina nafty za rok 2022 vychází z průměrné nákupní ceny za měsíc únor roku 2022. [20]

Tabulka 13: Roční vývoj cenové hladiny nafty [21]

Rok	Cena [Kč/l]
2011	34
2012	27
2013	26
2014	36
2015	31
2016	27
2017	30
2018	31
2019	32
2020	28
2021	37
2022	36

$$\text{průměrná roční míra růstu} = \sqrt[10]{\frac{36,71}{34,25}} - 1 = 0,007 \Rightarrow 0,7 \%$$

Uvažovaný průměrný roční růst cen naftového paliva, popsáný v úvodu kapitoly, se pohybuje okolo 0,7 %. To bohužel nemá úplnou vypovídající hodnotu, jelikož procentuální hodnota primárně souvisí pouze s krajními hodnotami. Z přiložené tabulky lze vyzorovat, že změny cen nafty jsou variabilní a roční eskalaci nelze s přesností předpovídat. Na základě různých zpráv a předpovědí je nepravděpodobné, že by se cenová hladina v budoucnu snížila. Proto budu při výpočtu vycházet ze současné cenové úrovně a předpokládám, že cena nafty bude eskalovat maximálně dvěma procenty ročně.

Roční palivové náklady jsem vypočítal pomocí vzorce zohledňujícího průměrný počet ujetých kilometrů, průměrnou cenu paliva v korunách na litr, průměrnou spotřebou uvedenou výrobcem vozu se zohledněním předpovědi eskalace cenové hladiny ve výši dvou procent. Pro lepší přehlednost jsem výsledné roční palivové náklady jednotlivých rodin spolu s ročním nájzdem uvedl tabelárně.

Tabulka 14: Přehled palivových nákladů referenčních rodin

Model použití	Roční nájezd	Roční palivové náklady
Referenční rodina A	20 000 km	33 840 Kč
Referenční rodina B	30 000 km	50 760 Kč
Referenční rodina C	60 000 km	101 520 Kč

5.3.2 Škoda Octavia G-Tec 1,5 TGI

Koncová cena plynového paliva se odvíjí od analogických faktorů jako v případě benzínového paliva. Cenový rozdíl zkoumaných paliv je primárně způsoben odlišnou spotřební daní. Paliva plynného skupenství totiž spadají do zvýhodněné sazby a jsou zatížena nižší spotřební daní. Během analýzy cen CNG si majitel automobilu musí být vědom analogie s konvenčním palivem, jehož cena se uvádí v korunách za litr. Pro srovnání se zavádí ekvivalenty: Jeden metr krychlový stlačeného plynu přibližně odpovídá jednomu litru benzínu, kdežto jeden kilogram stlačeného plynu odpovídá 1,4 litru benzínu. Při výpočtu budu vycházet z průměrných cen za metr krychlový v letech 2011-2022 uvedených v následující tabulce. Uvedená cenová hladina stlačeného zemního plynu za rok 2022 vychází z průměrné nákupní ceny za měsíc únor roku 2022.

Tabulka 15: Roční vývoj cenové hladiny CNG [21]

Rok	Cena [Kč/m ³]
2011	17
2012	17
2013	17
2014	18
2015	18
2016	18
2017	17
2018	18
2019	18
2020	19
2021	25
2022	27

$$\text{průměrná roční míra růstu} = \sqrt[10]{\frac{24,54}{16,7}} - 1 = 1,03 \Rightarrow 3 \%$$

Podobně jako u cen nafty, lze z přiložené tabulky vypočítat, že v porovnání s dlouhodobou stabilnější cenovou hladinou CNG došlo v roce 2021 k prudkému zvýšení. Současná průměrná cena plynu činí přibližně 24,54 Kč za metr krychlový. Přihlédnou-li k závislosti dodávky plynu ze zahraničí a k nepříznivým zprávám ohledně budoucího zlevňování plynu je pravděpodobné, že se cenová hladina nebude snižovat. Při výpočtu lze vycházet ze současné cenové úrovně a předpokládám, že další vývoj ceny CNG bude klidnější a bude eskalovat maximálně třemi procenty ročně.

Tabulka 16: Přehled palivových nákladů referenčních rodin

Model použití	Roční nájezd	Roční palivové náklady
Referenční rodina A	20 000 km	32 940 Kč
Referenční rodina B	30 000 km	49 410 Kč
Referenční rodina C	60 000 km	98 820 Kč

5.4 Náklady na nabíjení elektromobilu

V této kapitole se zaměřím na výpočet ceny provozu elektromobilu ve dvou scénářích. První scénář reprezentuje domácí dobíjení prostřednictvím stanice Wallbox. Budu vycházet z předpokladu, že majitel vozidla nabíjí pouze touto cestou. Druhý scénář je pro uživatele, kteří nemají možnost zřídit si v rámci soukromých prostor nabíjecí stanici a jsou schopni nabíjet pouze prostřednictvím veřejných dobíjecích stanic.

5.4.1 Náklady na elektřinu

Celková platba elektrické energie je složena ze tří základních složek, z regulované složky, neregulované složky a daně.

Cenovou výši regulované složky určuje Energetický regulační úřad. Regulovaná část sestává z distribučních poplatků, poplatku za rezervovaný příkon, příspěvku na podporu obnovitelných zdrojů, poplatku za systémové služby a poplatku za činnost operátora trhu s elektřinou OTE. Největší část ceny tvoří distribuční poplatky, které slouží ke krytí nákladů spojených s distribucí a přenosem elektrické energie, přispívají na údržbu a rozvoj distribuční soustavy. Rezervovaný příkon určuje množství nasmlouvané energie, které může odběratel využít, přičemž měsíční výše poplatku závisí na charakteristikách hlavního jističe. Z poplatků za systémové služby se financuje ta část nákladů společnosti ČEPS, která odpovídá nákladům na údržbu rovnováhy, provozu a údržby elektrifikační soustavy. [22]

Neregulovaná složka reprezentuje cenu za dodanou silovou elektřinu (Kč/MWh) a stálý měsíční plat (Kč/měsíc). Silovou část elektřiny je zákazník schopen přímo ovlivnit na základě své spotřeby. V případě dvoutarifní sazby je tvořena levnější elektřinou v rámci nízkého tarifu a dražší elektřinou ve vysokém tarifu.

Poslední položku tvoří daň z elektřiny, která se odvíjí od množství dodané elektřiny (Kč/MWh). Výjimku tvoří elektřina vyrobená z obnovitelných zdrojů, která není zatížena daní. [22]

5.4.2 Domácí nabíjení

Domácí nabíjení patří k uživatelsky nejpohodlnějšímu a nejoblíbenějšímu způsobu nabíjení. Tento způsob dobíjení využívá referenční rodina A a částečně rodina C. Jelikož vycházím z předpokladu, že majitel elektromobilu je fyzická osoba, budu uvažovat dobíjení v rámci tarifu D27d uzpůsobeného přímo pro elektromobilitu. Sazba D27d patří mezi dvoutarifní položky s operativním řízením doby platnosti nízkého tarifu. To znamená, že každý den je odběrateli účtována cena 16 hodin ve vysokém tarifu a 8 hodin cena v nízkém tarifu. Nízký tarif je zpravidla přímo vyhrazen pro noční nabíjení vozidla, tudíž doba platnosti je od 18:00 do 8:00. Odběratel musí prokázat, že vlastní nebo

užívá elektromobil. Pokud podmínku splňuje, dvoutarifovou sazbu D27d může využít pro celou svou domácnost. Může se stát, že majitel není schopen nabíjet pouze v rámci nízkého tarifu. Z toho důvodu budu uvažovat 10 % odebrané energie v rámci vysokého tarifu.

Při výpočtu vycházím z uvedené cenové hladiny sazby D27d distributora ČEZ určeného k nabíjení elektromobilu ve formě tříleté smlouvy. Vzhledem k trendu eskalace velkoobchodní ceny elektřiny považuji za rozumné si zařídit fixaci ceny. Fixace ceny zajišťuje garanci stejné cenové hladiny za silovou elektřinu po celou dobu trvání smlouvy. Početní postupy jsou velmi podobné, proto bude výpočet podrobněji popsán pouze v rámci referenční rodiny A.

Rodinný dům obou rodin disponoval už před zařízením domácí nabíjecí stanice rezervovaným příkonem 3x32 A. Jelikož jsem v počátku určil, že pro nabíjení není nutné posilovat jistič, domácnost nemusí oproti původnímu tarifu „poplatek za jistič“ připlácet nic navíc. To samé platí ve vztahu ke stálým měsíčním platbám, jelikož je domácnost platí nezávisle na využití elektromobilu. Obdrženou roční platbu za elektrickou energii stačí vydělit celkovou spotřebou a dostaneme cenu za 1kWh.

Referenční rodina A

Za předpokladu, že vozidlo Tesla model 3 s průměrnou spotřebou 16 kWh/100 km ročně urazí vzdálenost 20 000 kilometrů, vzniká celková teoretická spotřeba energie ve výši 3,2 MWh. Počítám také s možností, že se majiteli nepodaří celoročně nabíjet pouze v rámci nižšího tarifu. Pro hodnoty celkové roční spotřeby energie a rezervovaného příkonu 3x32 A jsem provedl následující ocenění. Jednotkové ceny položek byly čerpány z ceníku společnosti ČEZ platného od 8.10.2021.

Tabulka 17: Výpočet nákladů na elektřinu v rámci domácího nabíjení s DPH [23]

Sazba D27d		Jednotková cena	Roční platba (Kč)
Vysoký tarif (Kč/MWh)		5 966	1 909
Nízký tarif (Kč/MWh)		4 049	11 662
Měsíční platby (Kč/měsíc)		323	0
POZE	Podle jističe (Kč/měsíc)	1 750	0
	Podle spotřeby (Kč/MWh)	2 348	1 917
Celková roční platba za elektřinu (Kč)			17 446
Celková roční spotřeba energie (MWh)			3,2
Celková cena za kWh (Kč)			5,46

Sloupec „Jednotková cena“ představuje celkovou cenu za elektrickou energii včetně daně z elektřiny a systémových služeb. V položkách „Vysoký tarif“ a „Nízký tarif“ je zahrnuta cena za dodávku a distribuci elektřiny, daň z elektřiny a poplatek za systémové služby. „Měsíční platby“ reprezentují pravidelné měsíční platby za rezervovaný příkon, dodávku elektřiny a poplatky za činnost OTE. Položka POZE představuje částku na podporu výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů. [23]

Pro výpočet je důležité si uvědomit několik základních parametrů. V případě, že známe průměrnou spotřebu na sto kilometrů a celkový roční nájezd, na základě vypočtené cenové hladiny elektřiny za jednu kWh lze určit potřebné náklady na provoz elektromobilu při domácím nabíjení. Na rozdíl od palivových nákladů plynového a naftového vozidla jsem v rámci scénáře domácího nabíjení stanovil fixaci ceny elektřiny na tři roky. Proto je uveden vzorec vypovídající pouze pro první tři roky provozu vozidla. Po skončení této doby počítám s růstem ceny silové elektřiny ve výši dvou procent. Na základě uvažovaných vstupů výpočtu a parametrů elektrického vozidla činí celkové roční náklady domácího nabíjení referenční rodiny A **13 571 Kč** ročně.

Referenční rodina C

V případě referenční rodiny C budu postupovat analogicky. Majitel elektromobilu je schopen využívat domácí způsob nabíjení ze 40 % případů. Výpočet ceny za kWh referenční rodiny C provádím za předpokladu, že vozidlo Tesla model 3 s průměrnou spotřebou 16 kWh/100 km ročně urazí vzdálenost 60 000 kilometrů, vzniká tedy celková teoretická spotřeba energie ve výši 9,6 MWh. Jedná se o ale celkovou roční spotřebu, domácí spotřeba energie činí 3,84 MWh. Celkové roční náklady domácího nabíjení referenční rodiny C představují částku **16 285 Kč** ročně.

5.4.3 Veřejné a firemní nabíjení

Druhým uvažovaným způsobem nabíjení je situace, kdy má majitel elektromobilu možnost dobít pouze v rámci veřejně dostupné infrastruktury dobíjecích stanic. Tento způsob nabíjení využívá referenční rodina B a částečně rodina C. Koncept veřejného nabíjení spočívá v tom, že zákazník přijede na místo vyhrazené k nabíjení, dobije si automobil určitým množstvím energie a za odebranou energii zaplatí přímo poskytovateli služby.

Nejhustší síť nabíjecích bodů vlastní poskytovatelé energie ČEZ, E.ON a PRE, přičemž více než třetinu (38 %) dobíjecích bodů provozuje skupina ČEZ, 19 % skupina PRE a 10 % energetická společnost E.ON (stav k 30.6.2021) [24]. Po registraci u jedné ze společností je zákazník zvýhodněn nižším tarifem a výsledná cena dobíjení je při využití zaregistrovaných stanic nižší. Z pohledu zákazníka je složité rozlišit, který poskytovatel nabízí nejlevnější variantu, záleží totiž na ročním nájezdu a na trase, po které se majitel vozidla zpravidla pohybuje.

V současné době se také nabízí možnost využití firemních dobíjecích stanic. Majitel elektromobilu v takovém případě ponechává automobil nabíjet během pracovní doby. Zaměstnanec je často povinen registrovat elektromobil do systému, což umožní zaměstnavateli monitorovat množství vozidel a spotřebu elektrické energie. Velká část zaměstnavatelů a firem nabízí službu dobíjení jako benefit zcela zdarma, nicméně rostoucí portfolio elektrických vozidel s sebou přinese zvýšení nákladů zaměstnavatele a také potenciální platební povinnosti ze strany zaměstnanců. Běžné cenové struktury tvoří cena za kWh, platba za délku nabíjení nebo fixní paušální poplatek. Z toho důvodu jsem se v rámci výpočtu rozhodl uvažovat paušální měsíční poplatek ve výši 500 Kč. Odhad bych označil jako přiměřený, jelikož demonstruje určité zvýhodnění pro zaměstnance, ale na druhou stranu zásadně neovlivňuje model výpočtu jako v případě zcela dotovaného nabíjení.

Referenční rodina B

Velká část ročních tras rodiny se koná v oblasti Prahy. Z toho důvodu považuji za výhodnější využít služby společnosti PRE, která nabízí dostatečně rozšířenou síť nabíjecích stanic s nižší cenovou hladinou za kWh v porovnání se skupinou ČEZ. Společnost PRE využívá platební systém, ve kterém zákazník platí pouze za využitou silovou složku elektřiny, tedy v korunách za odebranou kWh. Roční eskalaci silové složky veřejného dobíjení budu uvažovat jako maximálně dvouprocentní. V následující tabulce je uveden ceník společnosti PRE platný od 1.4.2022.

Tabulka 18: Ceník veřejného dobíjení včetně DPH [25]

Tarif		AC (do 22 kW)	DC (do 75 kW)	DC (od 150 kW)
Registrovaný zákazník	Kč/kWh	6	7	9
Volné minuty	(min)	120	60	30
Cena za minutu	Kč/min	0,5	1	2
Neregistrovaný zákazník	Kč/kWh	5	6	8

Budu vycházet z předpokladu, že majitel vozidla referenční rodiny B používá automobil zejména pro pracovní cesty. V momentě, kdy je k dispozici firemní nabíjecí stanice, je majitel elektromobilu schopen nabíjet několik hodin v rámci pracovní doby nebo během jednání. Proto budu uvažovat využití firemního nabíjení ze 40 % případů a ve zbylých případech bude nabíjení probíhat za využití veřejně dostupné infrastruktury.

První možností veřejného dobíjení je využití střídavých dobíjecích stanic v okolí bydliště. Tato možnost je výhodná, pokud má řidič plánovanou delší cestu a je schopen tímto způsobem nabíjet přes noc. Dalším možným scénářem je tzv. doplňkové nabíjení, kdy majitel vozu využije možnost připojení během nákupu, návštěvy galerie a restaurace. Budu předpokládat, že majitel elektromobilu zmíněné způsoby střídavého nabíjení využije v 60 % případů veřejného dobíjení. V takovém případě je dle ceníku veřejného dobíjení zákazník povinen uhradit částku 6 Kč za kWh. Zbylých 40 % případů označím jako „naléhavé“ dobíjení, kdy je řidič nucen co nejdříve načerpat energii, aby mohl co nejdříve pokračovat ve své jízdě. Ačkoliv se řidič během nabíjení může z části věnovat občerstvení nebo práci, jako hlavní kritérium budu uvažovat nikoliv ušetření nákladů pro nabíjení, ale rychlost nabíjecího procesu. Pro vůz Tesla Model 3 je nejkratší doba nabíjení na 80 % kapacity dosažitelná při výkonu 150 kW (viz. kapitola 3.2.2). Při nabíjení o výkonech nad 99 kW si majitel vozidla připlatí, a to ve výši 10 Kč za kWh.

Za nevýhodu z pohledu zákazníka společnosti PRE bych si dovolil označit zavedení dobíjecího limitu. V praxi to znamená, že pokud majitel elektromobilu nabíjí přes stanovený časový limit volných minut, je penalizován. Poplatek zejména znevýhodňuje elektromobily, které disponují méně výkonnou palubní nabíječkou, protože vyžadují delší dobu nabíjení. Pro nabíjení vozidla Tesla Model 3 představuje tříhodinový časový limit komplikaci pouze v případě střídavého napětí, protože při nabíjecím výkonu 22 kW zabere dobíjení 6 hodin a 15 minut (viz. Kapitola 3.2.2). To znamená, že zákazník platí navíc zhruba polovinu nabíjecí doby, a to ve výši 0,5 Kč za minutu. V rámci modelovaného provozu Tesla Model 3 stráví uživatel připojením na střídavých stanicích 180 hodin ročně. Což znamená, že je majitel penalizován za 90 hodin ročně částkou 0,5 Kč/min. Zavedení položky placených minut vede k dodatečnému ročnímu doplatku 2 700 Kč.

Nyní již máme definované scénáře využití veřejné infrastruktury a můžeme se přesunout k výpočtu. Budu vycházet z předpokladu, že majitel elektromobilu najede v průměru 30 000 kilometrů ročně s uvažovanou spotřebou 16 kWh/100 km. Z uvedených údajů vyplývá, že celková roční spotřeba energie k dobíjení činí 4,8 MWh. Celkové roční náklady představují **29 436 Kč**.

Referenční rodina C

Jako dodavatele elektrické energie pro referenční rodinu C jsem vybral společnost ČEZ, jelikož v současné době nabízí nejhustší síť dobíjecích bodů rozmístěných po celém území České republiky. Společnost ČEZ v minulosti nabízela 4 různé tarify pro registrované zákazníky a jeden pro neregistrované. Jednotlivé tarify se lišily podle toho, v jakých intervalech řidič nabíjí na cestách a jaký má měsíční nájezd. Nicméně od roku 2022 společnost upravuje obchodní podmínky a smluvní vztahy služby elektromobilita. Zákazník nyní platí pouze za energii v korunách za odebranou kWh. Roční eskalaci cenové hladiny silové složky veřejného dobíjení budu uvažovat jako maximálně dvouprocentní. V následující tabulce je uveden ceník společnosti ČEZ platný od 1.3.2022.

Tabulka 19: Ceník veřejného dobíjení včetně DPH [26]

Tarif	Jednotka	AC	DC (do 99 kW)	HPC (od 99 kW)
Registrovaný zákazník (ČEZ)	Kč/kWh	6 Kč	8 Kč	10 Kč
Neregistrovaný zákazník (ČEZ)		8 Kč	10 Kč	12 Kč

Majitel vozidla využívá veřejné nabíjení ze 60 % případů, z toho 80 % představuje stejnosměrné nabíjení a 20 % představuje využití střídavých stanic. Budu vycházet z předpokladu, že majitel elektromobilu najede v průměru 60 000 kilometrů ročně s uvažovanou spotřebou 16 kWh/100 km. Z uvedených údajů vyplývá, že celková roční spotřeba energie za použití veřejného nabíjení činí 5,76 MWh. Na základě definovaných scénářů a možností nabíjení představují celkové roční náklady na veřejné dobíjení **52 992 Kč**.

5.5 Provozní náklady

Ve své práci uvažuji automobily zcela nové a nepoužité, tudíž se nepředpokládají závažné a neočekávané poruchy v důsledku opotřebení nebo špatné údržby předešlým majitelem. Oceněné náklady jsou čistě orientační, jelikož se v obecné rovině těžko odhadují. V reálném provozu záleží na mnoha různých faktorech, od způsobu jízdy, věku a zkušenosti řidiče až po případy, kdy jednotlivé komponenty automobilu nevydrží bez závady po celou dobu své predikované životnosti. Uvedené hodnoty v rámci kapitoly 5.5 budou meziročně navyšovány o inflaci 2 %.

5.5.1 Servisní náklady

Servisní náklady je složité přesně ocenit, závisí totiž na závažnosti poruchy, schopnostech mechanika a současného stavu jednotlivých komponentů. Je taky potřeba vzít v úvahu, že výběr vozidel sestává z odlišných pohonů. Z toho důvodu je vhodné vyhledat autorizovaný a specializovaný servis, ve kterém mají již s daným elektrickým, plynovým nebo naftovým pohonem zkušenosti. Jelikož se cenové hladiny služeb napříč územím celé České republiky liší, pro usnadnění srovnání budu u referenčních rodin uvažovat stejnou cenovou hladinu servisních služeb nezávisle na bydlišti a místě opravy. Jako referenční servis jsem použil servisní řetězec Drivelab v Praze, který nabízí služby jak pro vozy Škoda Octavia, tak pro Tesla Model 3.

Plynová a naftová verze vozu Škoda Octavia vyžaduje při reálném provozu ve většině případů stejné údržbové standardy. Majitel plynového agregátu je navíc ze zákona nucen paralelně k pravidelným technickým kontrolám provádět také revizi plynového systému. Revize spočívá především v kontrole těsnosti a technického stavu plynových komponentů. Předepsaná četnost prohlídek se odvíjí od typu plynového systému a zda je továrně nebo dodatečně vestavěn. V případě již při výrobě vestavěného systému pravidelnost revizí zpravidla kopíruje technické kontroly. Cenová hladina kontroly se pohybuje mezi 300 až 500 Kč. Budu tedy uvažovat průměr 400 Kč.

Elektromobil narozdíl od spalovacího a plynového agregátu vyžaduje značně jednodušší pravidelnou údržbou. Elektromobil postrádá součásti jako palivové a olejové filtry, zapalovací svíčku, výfukový systém nebo převodovku. V zásadě jediné náklady na provoz elektromobilu z pohledu servisu jsou kontrola řízení, klimatizace, brzdového systému, kol a baterie. Vyjmenované servisní položky jsou oceněny analogicky, jako v případě naftového a plynového agregátu. Elektrický motor je také konstrukčně výrazně jednodušší v porovnání se spalovacím a zážehovým motorem. Absence pohyblivých pístů a částí vede k vyšší životnosti a nižší četnosti poruch stroje. Rozdíl v servisních nákladech také tvoří trakční baterie. Jelikož se jedná o jednu z nejdůležitějších a nejdražších částí elektromobilu, baterie vyžaduje správné zacházení a v případě výměny se jedná o nezanedbatelnou servisní položku. V případě vypršení kilometrové záruky je majitel elektromobilu nucen částku hradit ze svých peněžních prostředků. V praxi obměna probíhá tak, že dojde k výměně pouze modulu s

porušenými články nebo rovnou celé baterie. Řada výrobců cenovou hladinu neuvádí, jiní zase sdělují pouze široký cenový rozsah. Z toho důvodu provedu odhad na základě průměrné ceny baterií uvedené v kapitole 3.1. Jelikož je celková cena výměny závislá na stavu baterie a závažnosti poruchy, ocenění provedu pro celou baterii. Baterie Tesla Model 3 disponuje kapacitou 60 kWh, což při ceně 132 \$/ kWh činí přibližně 158 400 Kč. Přičteme-li k tomu náklady za servis, celková cena může vzrůst až na 200 000 Kč a více.

5.5.2 Pojištění a poplatky

V této podkapitole analyzuji náklady, které s vlastnictvím automobilu úzce souvisejí a jsou tvořeny ze zákona povinnými pojištěními a pravidelnými poplatky.

Dálniční známka

Dálniční známka představuje nutný výdaj pro velkou část řidičů. Zatímco u naftového a benzínového pohonu je cena dálniční známky 1500 Kč ročně, v případě plynového a čistě elektrického vozidla se částka může lišit. V současné době je schváleno osvobození od dálničních poplatků vozidla splňujících emise plynu CO₂ do 50 g/km. Co se týče plynového agregátu, majitel ušetří polovinu obvyklé částky a platí zvýhodněných 750 Kč ročně. Jednou z výhod pořízení elektromobilu je možnost bezplatného požádání o registrační značení EL. Následně je majiteli elektrického vozidla odpuštěn registrační poplatek nutný k pořízení dálniční známky. Při pořízení nového vozu je majitel povinen uhradit registrační poplatek ve výši 800 Kč.

Povinné ručení a havarijní pojištění

Povinné ručení je položka, kterou je povinen platit každý vlastník vozidla. Cenová hladina je velmi variabilní, odvíjí se totiž od atributů osoby pojistníka, trvalého bydliště, typu vozidla, až po parametry motoru. Nejprve je nutné si definovat parametry pojistné osoby. Jelikož v rámci práce uvažuji dospělé fyzické osoby s bydlištěm v okolí Prahy, bez bonusů, v jednotném věku 40 let. Havarijní pojištění je určeno k finančnímu pokrytí škod způsobenými přírodními živly nebo haváriemi. Cenová hladina pojištění se odvíjí zejména od druhu vozidla, jeho hodnoty, stáří vozidla a bydliště majitele. Po provedení rešerše a využití služeb srovnávacích portálů jsem se dopracoval k zvýhodněnému balíčku, kombinujícímu havarijní pojištění a povinné ručení dohromady.

Tabulka 20: Přehled cenových hladin balíčku povinného ručení s havarijním pojištěním

Povinné ručení + havarijní pojištění	Cenová hladina
Škoda Octavia 2,0 TDI	18 665 Kč
Škoda Octavia 1,5 TGI	16 199 Kč
Tesla Model 3	29 250 Kč

Částka za pojištění vozidla Tesla Model 3 je ovlivněna vyšší pořizovací cenou, protože bylo nutné nastavit adekvátní pojistné limity v rámci pojištění. S rostoucí kilometrovým nájездem a stářím vozidla se cenová hladina pojištění a ručení mění, tento faktor jsem se však rozhodl z důvodu možného vzniku nepřesností zanedbat a uvažuji částku měnící se pouze o inflační faktor 2 % ročně.

Technická prohlídka

Majitel automobilu je také povinen podstoupit pravidelné technické prohlídky. STK, zkratka popisující stanice technické kontroly, se zaměřuje na kontrolu vozidel a rozhoduje o jejich technické způsobilosti. Jelikož cena závisí na lokalitě dané stanice, budu pro vybraná vozidla uvažovat stejnou

kontrolní společnost. V případě, že je automobil nový, je potřeba provádět pravidelnou kontrolu až po čtyřech letech provozu s následným intervalem dvou let. Uvažovaná cena technické kontroly je ve výši 1000 Kč. Součástí technické kontroly je také kontrola emisí. V případě benzínového motoru se jedná o částku 700 Kč. Kontrolu emisí u elektromobilu nemá smysl provádět, tudíž za ni majitel neplatí.

Silniční daň

Jedním z dalších poplatků vlastníka automobilu je silniční daň. Silniční daň je povinná pro podnikatele a jelikož vycházím z předpokladu, že majitelé elektromobilu jsou zaměstnanci, tento náklad v případě nepodnikající osoby zcela odpadá.

5.5.3 Parkování

Další položkou provozních nákladů je parkování. V současné době je na území České republiky majitel elektromobilu zvýhodněn pouze v Praze. Město nabízí možnost parkování ve vyhrazených zónách zdarma. Konkrétně se jedná o modré a fialové zóny určené pro rezidenty. V případě konvenčního automobilu činí roční poplatek za parkovací oprávnění 1 200 Kč. Placené parkování mimo oblast Prahy v rámci výpočtu zanedbávám, protože se jedná o stejný výdaj u všech vozidel, nehledě na zvýhodnění elektromobility. Ve vztahu k parkování je také dobré zmínit omezení platící pro plynová vozidla. Kvůli potenciálnímu samovolnému úniku plynu z nádrže je z bezpečnostních důvodů zakázáno parkování ve starších podzemních a uzavřených garážích. Nicméně moderní garážové komplexy splňující potřebné normy jsou vybaveny klimatizací a senzory, které detekují případný výskyt zemního plynu, takže v nich majitel plynového vozidla parkovat může.

5.6 Výsledky ekonomického zhodnocení

Cílem kapitoly je provést přehledné shrnutí výsledků ekonomických výpočtů provozních modelů. Uvedené výstupy nákladového NPV jsem rozlišil na dvě složky: „Provozní + INV“ a „Provozní“. První složka počítá se zahrnutím počáteční investice a prodejem vozidla a druhá složka počítá s čistě provozními náklady. Důvodem rozlišení je skutečnost, že uvažovaný elektromobil vykazuje výrazně vyšší počáteční investici ve srovnání s plynovým a naftovým agregátem. Díky separaci na dvě různé složky NPV lze lépe vyhodnotit výši nákladů pouze po provozní stránce. V druhé části kapitoly provedu citlivostní analýzu, která slouží ke grafickému znázornění vlivu změn odhadovaných parametrů na ekonomické výstupy.

5.6.1 NPV

NPV, z anglického Net Present Value, je kritérium ekonomické efektivnosti, definované sumou diskontovaných peněžních toků generovaných po celou dobu životnosti investice. Jelikož ve své práci hodnotím pouze náklady spojené s provozem a pořízením automobilu, nikoliv zisk, budu uvažovat hotovostní toky pouze nákladové. To znamená, že za výhodnější variantu výběru bude označena ta s nejnižší hodnotou NPV.

Výsledky ekonomického srovnání práce vycházejí z uvedených cen energií a pohonných hmot z počátku roku 2022. Vzhledem k výraznému zdražování komodit a energií v měsících března, dubna a května jsem se rozhodl prozkoumat výstupy srovnání na základě průměrných cen za měsíc květen.

Ačkoliv došlo k obecnému zdražení a náklady provozu se v rámci všech variant zvýšily, relace rozhodnutí však zůstává nezměněna.

5.6.1.1 Referenční rodina A

Prvním definovaným scénářem je rodina bydlící v rodinném domě s průměrným ročním nájezdem 20 000 kilometrů. Vzhledem k možnosti nabíjení elektromobilu v garážovém prostoru budovy a relativně nízkého denního nájezdu předpokládám, že si rodina vystačí čistě s domácím dobíjením. Zbylé určující parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 21: Parametry referenční rodiny A

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Rodinný dům, vesnice
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	20 000 km
Délka využití vozidla	8 let
Celkový nájezd	160 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Čistě domácí
Výměna baterie elektromobilu	Ne

Na základě kritérií ekonomické efektivity NPV a RCF lze označit za ekonomicky nejméně výhodnou variantu výběru vozidlo Tesla Model 3 a za nejvýhodnější Škodu Octavia 1,5 TGI. Navzdory tomu, že elektromobil vykazuje nejnižší provozní náklady, pořizovací cena vozidla je o téměř 72 % vyšší v porovnání s vozidlem Škoda Octavia 2,0 TDI. Ekonomicky nejvýhodnější investici proto představuje plynový agregát, který má nižší provozní náklady v porovnání s naftovým protějškem a zároveň nejnižší pořizovací cenu.

Tabulka 22: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny A

Referenční rodina A Model vozidla	Pořizovací cena (tis. Kč)	NPV (tis. Kč)		RCF (tis. Kč)
		Provozní + INV	Provozní	
Škoda Octavia 2,0 TDI	789,9	925	412	149
Tesla model 3	1356,02	1226	320	197,4
Škoda Octavia 1,5 TGI	749,9	876,1	378	141,1

5.6.1.2 Referenční rodina B

Druhý model popisuje manželský pár bydlící v činžovním domě na sídlišti s průměrným ročním nájezdem 30 000 kilometrů. Vzhledem k definovanému charakteru bydliště je majitel elektromobilu odkázán pouze na využití firemních a veřejných prostor. V tomto směru jsem se rozhodl procentuální zastoupení určit v poměru: 40 % případů firemní nabíjení a 60 % tvoří využití veřejně dostupných dobíjecích stanic.

Tabulka 23: Parametry referenční rodiny B

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Byt, městská oblast
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	30 000 km
Délka využití vozidla	8 let
Celkový nájezd	240 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Veřejný (40 %) + firemní (60 %)
Výměna baterie elektromobilu	Ne

Tabulka 24: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny B

Referenční rodina B Model vozidla	Pořizovací cena (tis. Kč)	NPV (tis. Kč)		RCF (tis. Kč)
		Provozní + INV	Provozní	
Škoda Octavia 2,0 TDI	789,9	1032,2	497	179,6
Tesla model 3	1324,9	1290,7	366	224,6
Škoda Octavia 1,5 TGI	749,9	992,6	469	172,7

Navzdory odlišnému ročnímu nájezdu a způsobu dobíjení elektromobilu je výstup ekonomického porovnání analogický jako v předešlém případě. Ekonomicky nejméně výhodnou variantu tvoří vozidlo Tesla Model 3 a nejuvýhodnější investici představuje opět Škoda Octavia 1,5 TGI. Navíc je patrné, že s rostoucím ročním nájezdem stoupá ekonomická výhodnost elektromobilu, což je způsobeno zejména nižšími provozními náklady.

5.6.1.3 Referenční rodina C

Poslední provozní scénář reprezentuje rodina bydlící v rodinném domě s ročním nájezdem 60 000 km. Cílem modelu je simulace vysokého ročního nájezdu zaměstnance realitní kanceláře s cestami po celé České republice. Navzdory tomu, že rodinný dům disponuje možností využití garážového prostoru za účelem domácího nabíjení, kvůli dlouhým cestám je nutné přejít ke kombinaci s veřejným způsobem nabíjení. V tomto směru jsem se rozhodl procentuální zastoupení určit v poměru: 60 % případů veřejné nabíjení a 40 % domácí nabíjení.

Tabulka 25: Parametry referenční rodiny C

Charakteristika rodiny	
Bydliště	Rodinný dům
Popis majitele	40 let, zkušený řidič
Provoz vozidel	
Roční nájezd	60 000 km
Délka využití vozidla	5 let
Celkový nájezd	300 000 km
Způsob nabíjení elektromobilu	Domácí (40 %) + veřejné (60 %)
Výměna baterie elektromobilu	Ano

Při reálném provozu je potřeba brát v úvahu potenciální výměnu trakční baterie i po vypršení záruky výrobce. Vlivem vyššího nájezdu totiž dochází k degradaci baterie, což vede k celkovému zhoršení vlastností a snížení dojezdu. Proto jsem se rozhodl ve vztahu k třetímu modelu provozu uvažovat dva provozní scénáře elektromobilu. První je označen jako „optimistický“ scénář, kde není potřeba během uvažované doby využití vozidla přejít k výměně baterie. Za tzv. „pesimistický“ scénář označím situaci, kdy bude zapotřebí nutná výměna baterie hrazená z rodinného rozpočtu, jelikož došlo k překročení kilometrového limitu záruky.

Tabulka 26: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny C

Referenční rodina C		Pořizovací cena (tis. Kč)	NPV (tis. Kč)		RCF (tis. Kč)
Model vozidla			Provozní + INV	Provozní	
Škoda Octavia 2,0 TDI		789,9	1028,6	599	244,2
Tesla model 3	Optimistický	1356,02	1195,1	439	283,7
	Pesimistický	1356,02	1337,7	581,65	317,6
Škoda Octavia 1,5 TGI		749,9	987	587	234,3

Ani v případě posledního scénáře využití nedošlo k obměně výsledků ekonomického srovnání. Vyšší roční nájezd modelu opět ukazuje, že u elektromobilu roste ekonomická výhodnost s mírou jeho využívání, proto bude tento vliv podrobněji zkoumán v kapitole Citlivostní analýza. Vyšší míra používání však s sebou nese rizika v podobě vyšších provozních nákladů a v případě elektromobilu nutnou výměnu baterie. Situace, kde je nutná výměna trakční baterie, je demonstrována v rámci pesimistického provozního scénáře. Navzdory tomu, že se Tesla může i v takovém případě pyšnit nižším provozním NPV v porovnání s naftovým a plynovým agregátem, její celková ekonomická výhodnost klesla o více než 10 %.

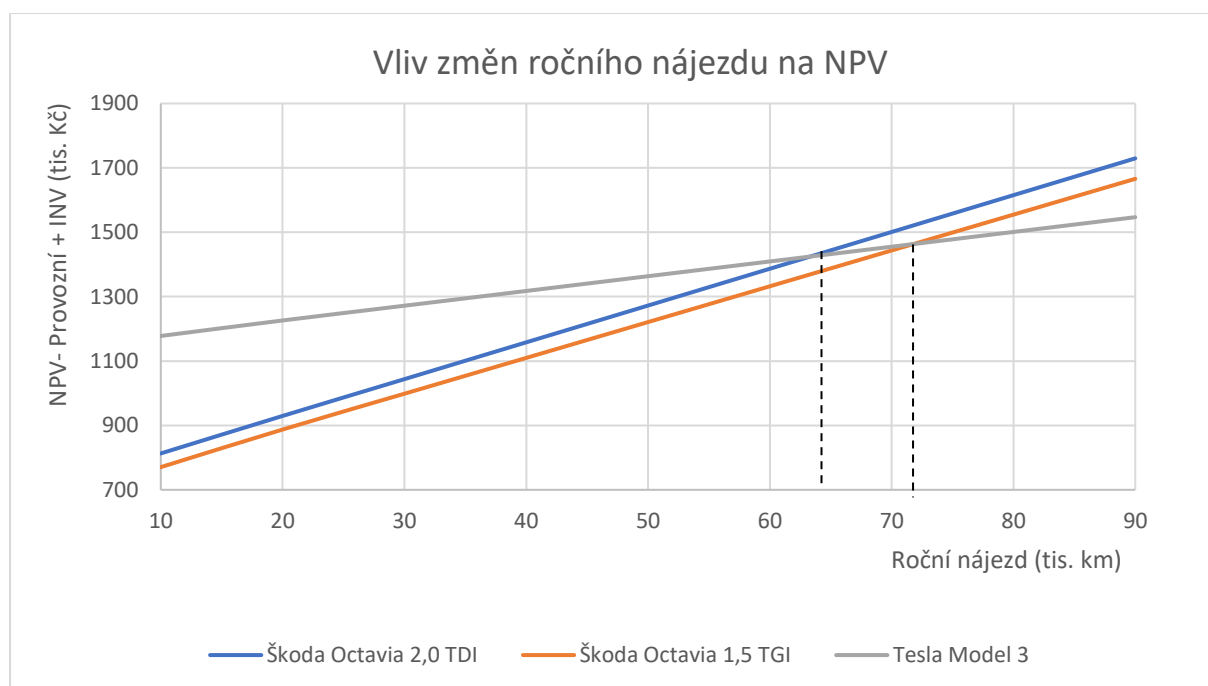
5.6.2 Citlivostní analýza

Analýza citlivosti je metoda určená ke zjištění vlivu změn vstupních parametrů modelu na výsledek. Vzhledem k tomu, že většinu vstupních parametrů během práce odhaduji, aplikací citlivostní analýzy vytvořím grafický model demonstrující vývoj výsledných hodnot na změnu vstupního parametru. Kapitola je rozdělena do tří částí vyhrazených pro jednotlivé referenční rodiny. V rámci každé části budu uvádět grafické závislosti zkoumající vliv odchylky diskontu, ročního nájezdu a změny roční eskalace cen pohonných hmot a energií.

5.6.2.1 Referenční rodina A

Grafická závislost č.2 zobrazuje vliv změny ročního nájezdu na celkové NPV spolu se zahrnutím počáteční investice. Lze vypořádat, že u elektromobilu skutečně roste ekonomická výhodnost s mírou jeho využívání. Vlivem levnějšího provozu se přibližně od nájezdu 64 000 kilometrů ročně stává elektromobil ekonomicky výhodnější v porovnání s naftovým agregátem, navzdory vyšší počáteční investici. Při ročním nájezdu 72 000 kilometrů se elektromobil stává ekonomicky výhodnější ve srovnání s plynovým agregátem. Je ale nutné konstatovat, že v posledním případě se jedná o vysoký roční nájezd, což by mělo přímý vliv na zkrácení životnosti komponentů všech vozidel a zejména na stav a životnost trakční baterie.

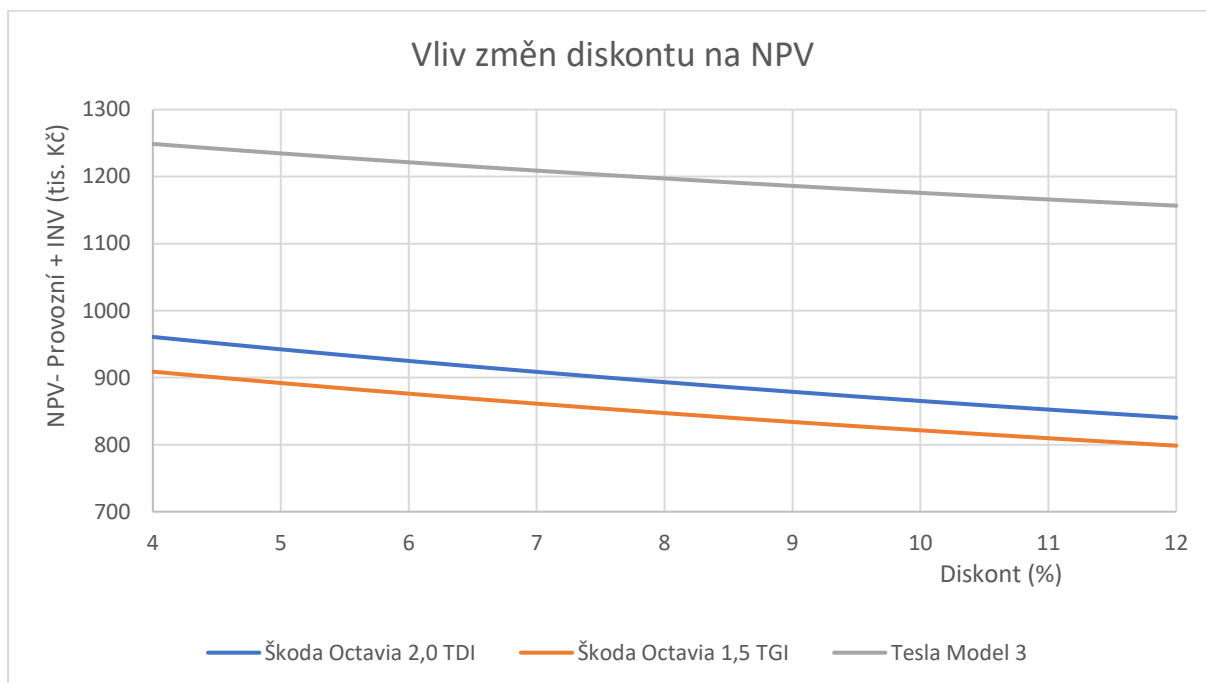
Graf 2: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV



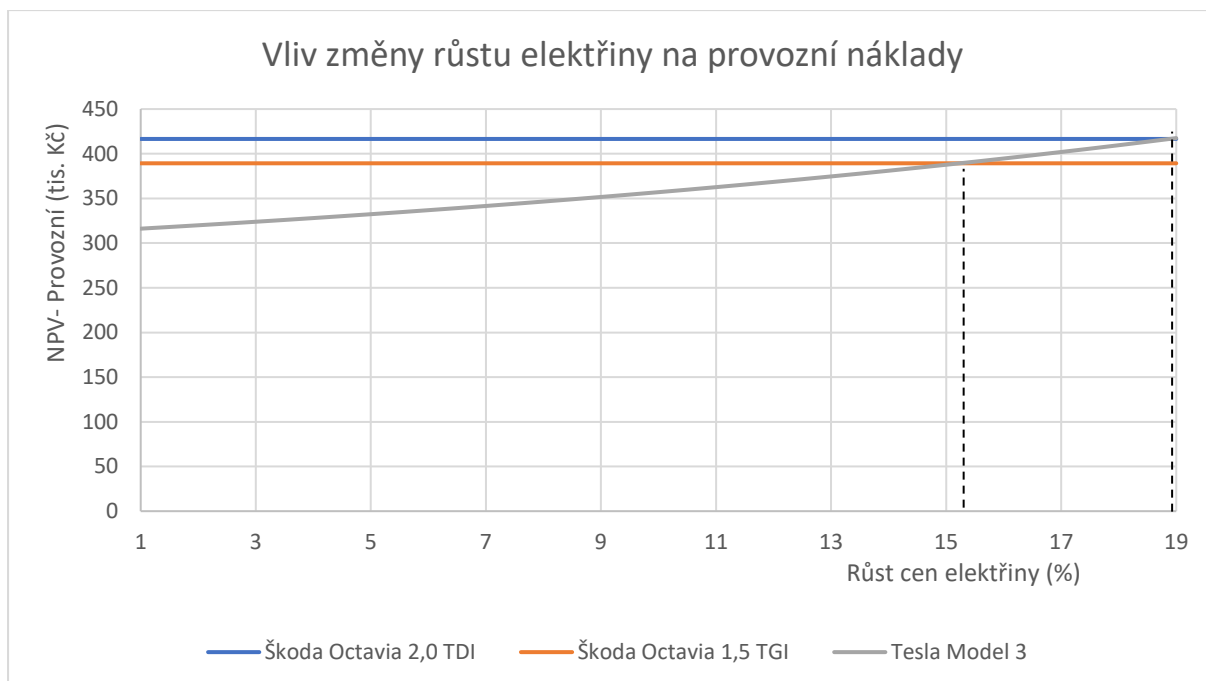
V úvodu 5. kapitoly zabývající se ekonomickou stránkou provozu vozidel jsem stanovil diskontní míru investice. Grafická závislost č.3 popisuje vliv volby diskontní sazby na výsledné NPV spolu se zahrnutím počáteční investice. Se zvyšující se diskontní sazbou hodnota NPV klesá. Zvýšení sazby znevýhodňuje koupi elektromobilu, protože vyšší diskont se podepíše na snížení velikosti úspor palivových a provozních nákladů spojených s vlastnictvím elektromobilu v porovnání s plynovým a

naftovým agregátem. Můžeme vypočítat, že změna parametru do výše 12 % nijak nepřispěla ke změně výstupu porovnání vozidel, protože diskont výsledné NPV změní jen nepatrně.

Graf 3: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV



Graf 4: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV

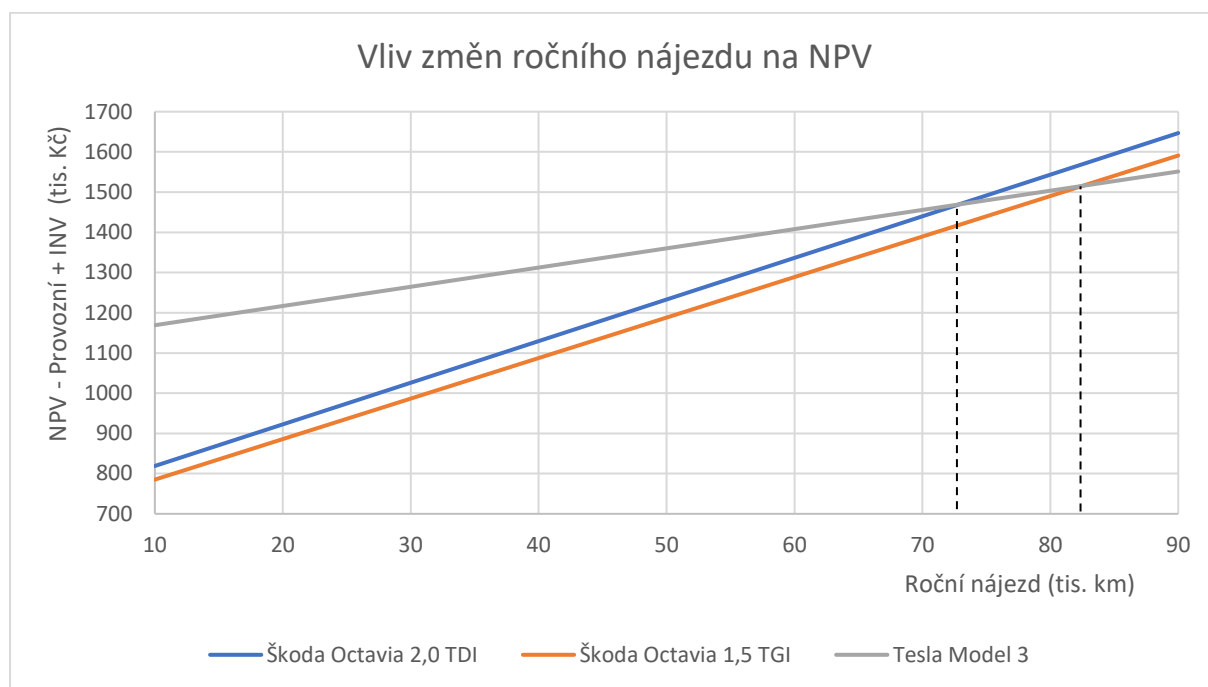


Podstatnou část provozních nákladů vozidla tvoří palivové náklady. Vezmeme-li v úvahu definovaný provoz a standardní vývoj ekonomiky, je provoz elektromobilu méně nákladný. Z toho důvodu jsem se rozhodl do citlivostní analýzy zahrnout problematiku nadstandardního meziročního růstu cen elektrické energie. Tento jev vztahuji k rovnoměrnému dvouprocentnímu růstu cenových

hladin pohonných hmot. Lze vypočítat, že při procentuální hodnotě 15,2 % vzniká bod, ve kterém se křivky provozních nákladů plynového a elektrického vozu protnou. Z toho vyplývá, že při meziroční eskalaci cen elektřiny o více než 15,2 % se stává provoz Škoda Octavia 1,5 TGI méně nákladným v porovnání s vozidlem Tesla Model 3. Pokud by došlo k meziročnímu růstu cen energií o necelých 19 %, provoz elektromobilu by se stal analogicky nákladnější v porovnání také s naftovým agregátem.

5.6.2.2 Referenční rodina B

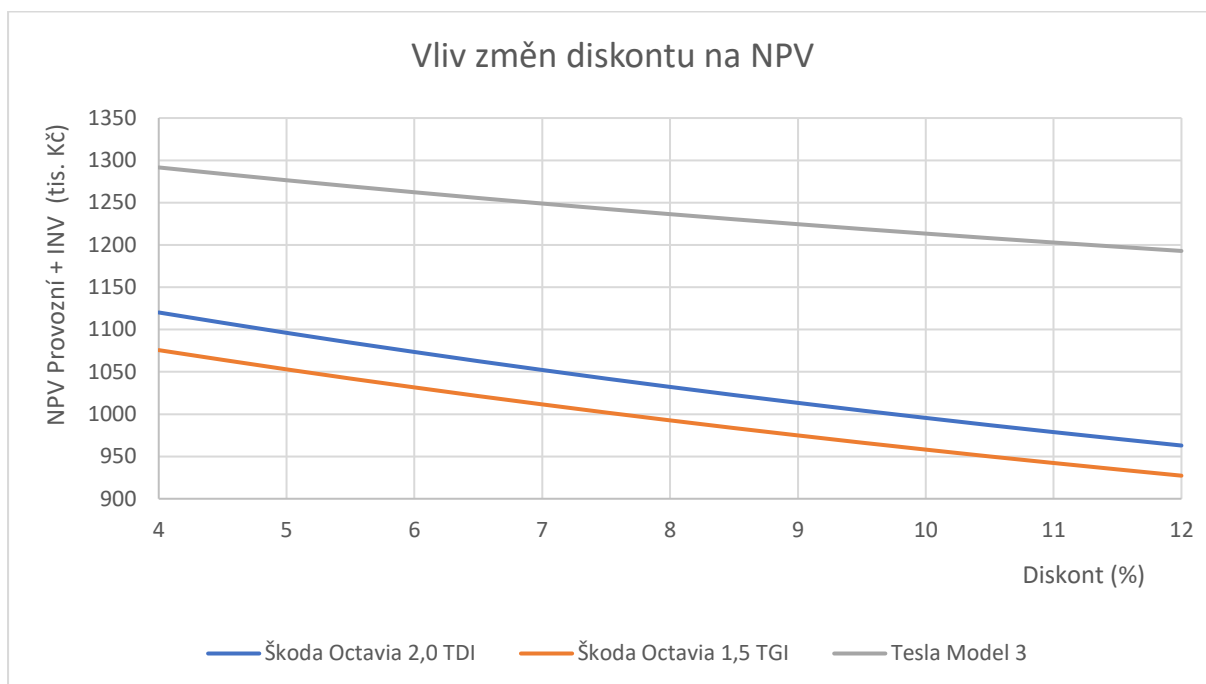
Graf 5: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV



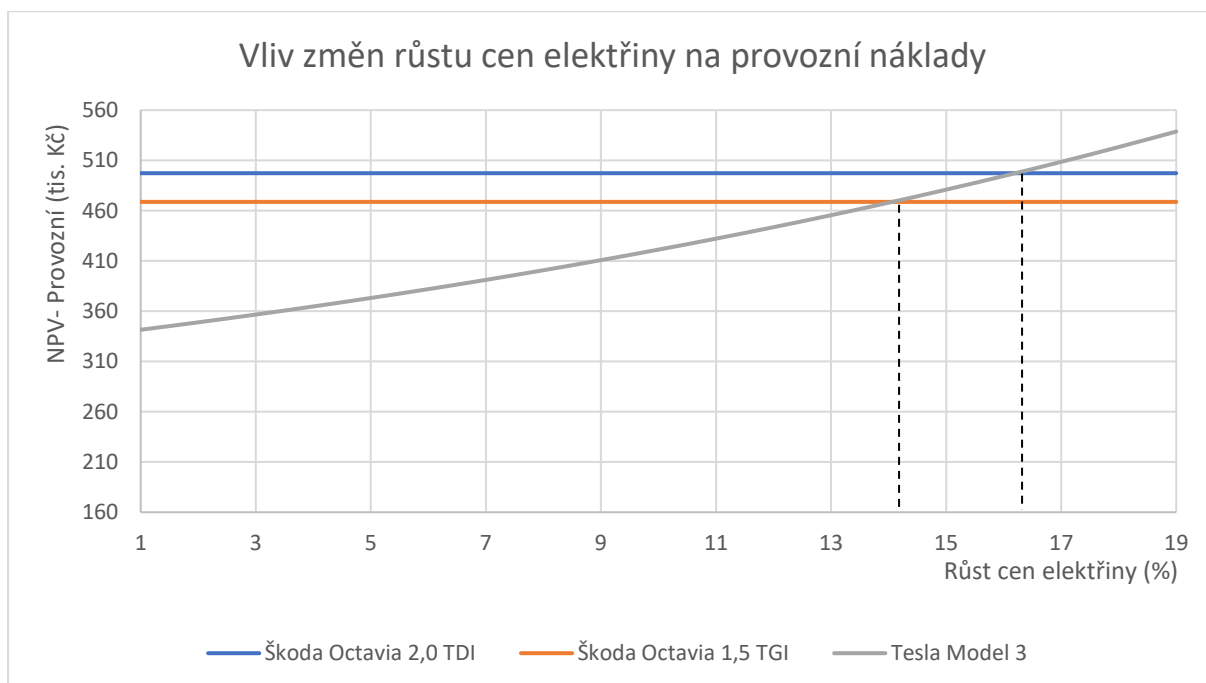
Také v druhém modelu provozu lze pozorovat podobný vývoj nákladových křivek při změně ročního nájezdu. Model představuje odlišné nabíjení elektromobilu, přičemž 40 % nabíjení probíhá za použití veřejných stanic a zbytek za použití firemních stanic. Proto je úspora provozních nákladů čistě elektrického vozidla menší v porovnání s předchozím modelem. Z tohoto důvodu se levnější provoz projeví až při vyšším ročním nájezdu. Za předpokladu ročního nájezdu 74 000 kilometrů se stává elektromobil ekonomicky výhodnější variantou ve srovnání s naftovým agregátem a při nájezdu 84 000 kilometrů ročně se stává také výhodnější ve srovnání s plynovým agregátem.

Grafická závislost č. 6 popisuje vliv volby diskontní sazby na výsledné NPV spolu se zahrnutím počáteční investice. Trend snižování NPV se změnou diskontní míry je analogický, podobně jako v předchozím rodinném modelu. S růstem diskontní sazby klesá provozní NPV, což vede ke snížení rozdílu mezi levnějším provozem elektromobilu v porovnání s naftovým a plynovým agregátem.

Graf 6: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV

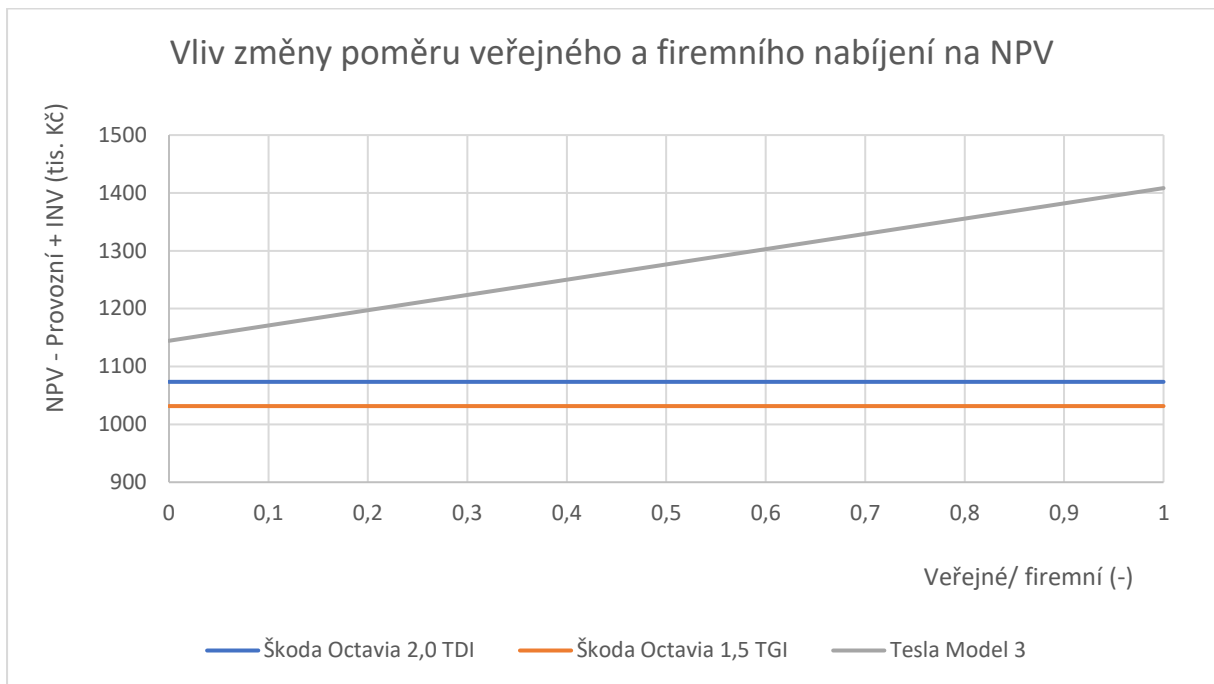


Graf 7: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV



Z grafické závislosti č.7 lze vypočítat, že na rozdíl od předchozího modelu dochází k situaci, v níž se stává provoz plynového agregátu levnější již od nižších hodnot meziročního růstu cenových hladin elektrické energie, konkrétně od hranice 14 %. Tato skutečnost je způsobena nákladnějším nabíjením elektromobilu. Provoz naftového vozidla se stává levnějším v případě, kdyby došlo k eskalaci cen elektřiny nad hodnotu 16,2 %.

Graf 8: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV

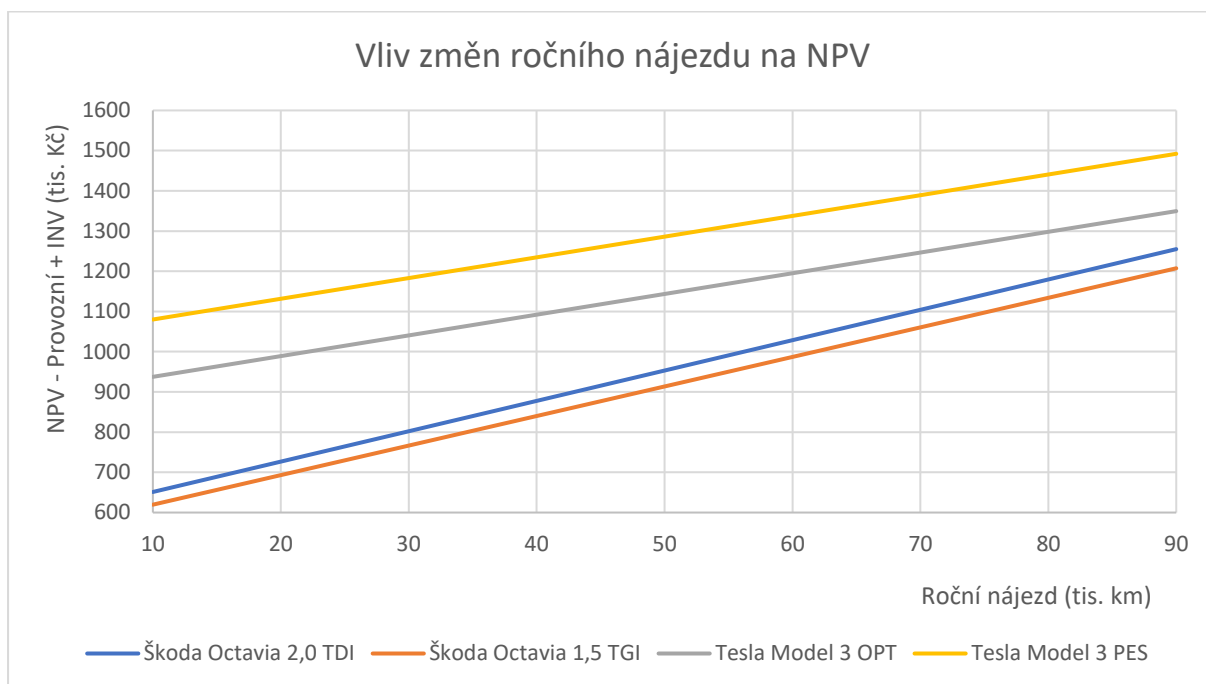


Definovaný model provozu umožňuje majiteli elektromobilu použití pouze kombinace firemních a veřejných dobíjecích prostor. Definovaný poměr byl určen na začátku práce, proto v rámci analýzy testuji vliv různé změny poměru na výsledné provozní náklady automobilu. NPV naftového a plynového vozidla zůstává stejné, jelikož se na ně změna parametru nevztahuje. Krajní hodnoty symbolizují čistě veřejné nebo firemní dobíjení. Krajní nulová hodnota na ose x znázorňuje situaci, kde by majitel elektromobilu využíval čistě firemní způsob nabíjení. To znamená, že by za dobíjení vozidla platil pouze paušální poplatek 500 Kč měsíčně. Navzdory tomu, že se jedná za mého předpokladu o velice výhodný scénář dobíjení, celkové nákladové NPV elektromobilu by v takovém případě bylo stále o 7 % vyšší v porovnání s naftovým pohonem.

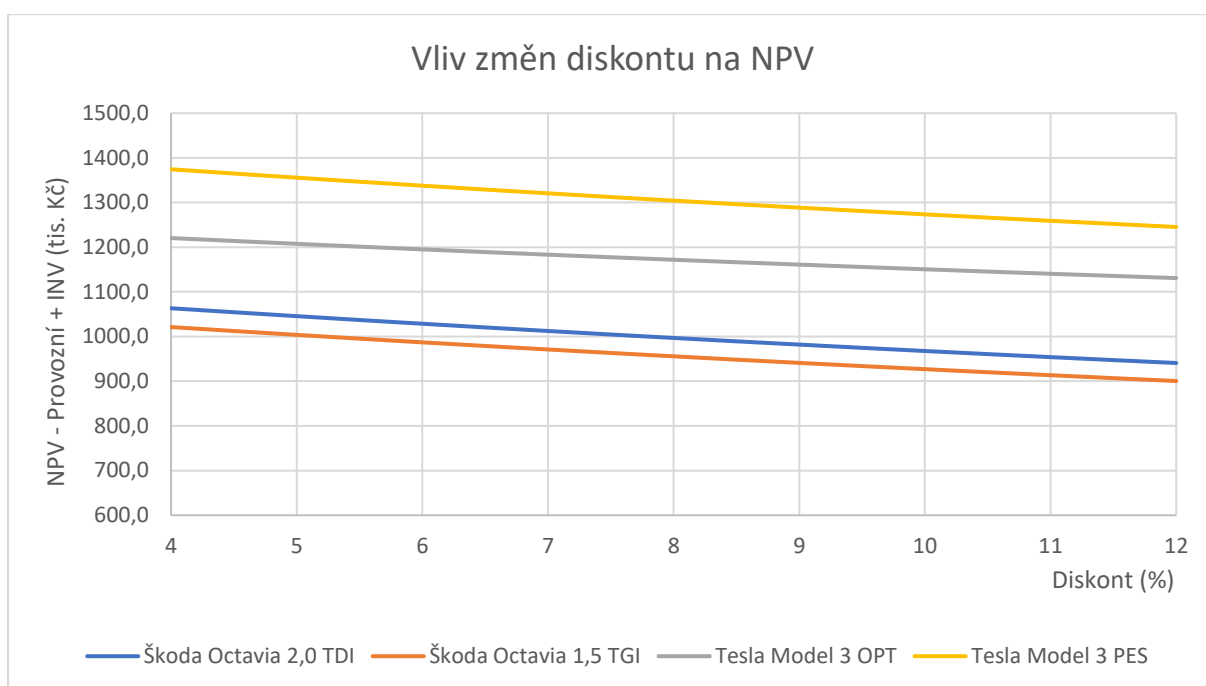
5.6.2.3 Referenční rodina C

Poslední model provozu dokazuje, že rozdíl mezi celkovým NPV vozidel se snižuje nejen s rostoucím ročním nájedem, ale také s délkou životnosti vozidla. Délku využití vozidla jsem totiž určil ve výši pěti let, což způsobuje, že levnější provoz elektromobilu se tolik neprojeví, jako tomu bylo v předchozích osmiletých provozech. Tato skutečnost vede k tomu, že se v rámci analýzy nákladové křivky jednotlivých vozidel vůbec neprotnou. Na obměnu výsledku tedy nemá změna ročního nájedzu žádný vliv.

Graf 9: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV

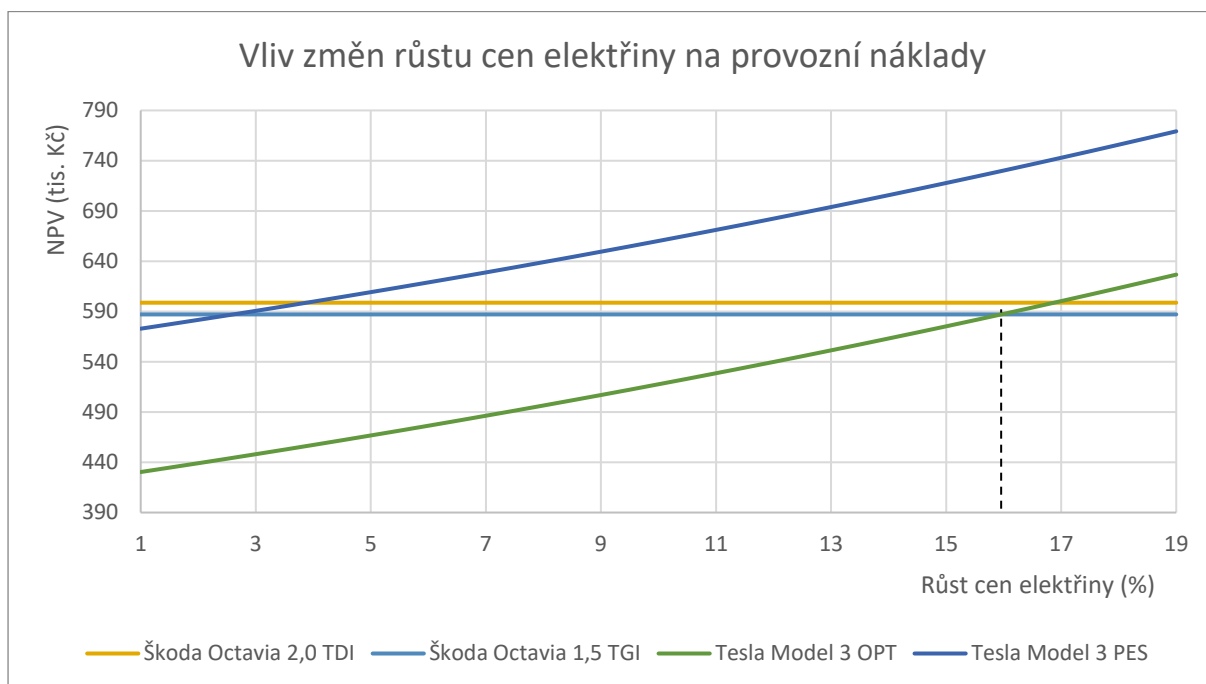


Graf 10: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV



Grafická závislost č. 10 popisuje vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV spolu se zahrnutím počáteční investice. Trend snižování NPV se změnou diskontní míry je analogický, stejně jako v předchozích případech. S růstem diskontní sazby klesá provozní NPV, což vede ke snížení rozdílu mezi levnějším provozem elektromobilu v porovnání s naftovým a plynovým agregátem. Změna parametru do výše 12 % nijak nepřispěla k obměně výstupu porovnání vozidel.

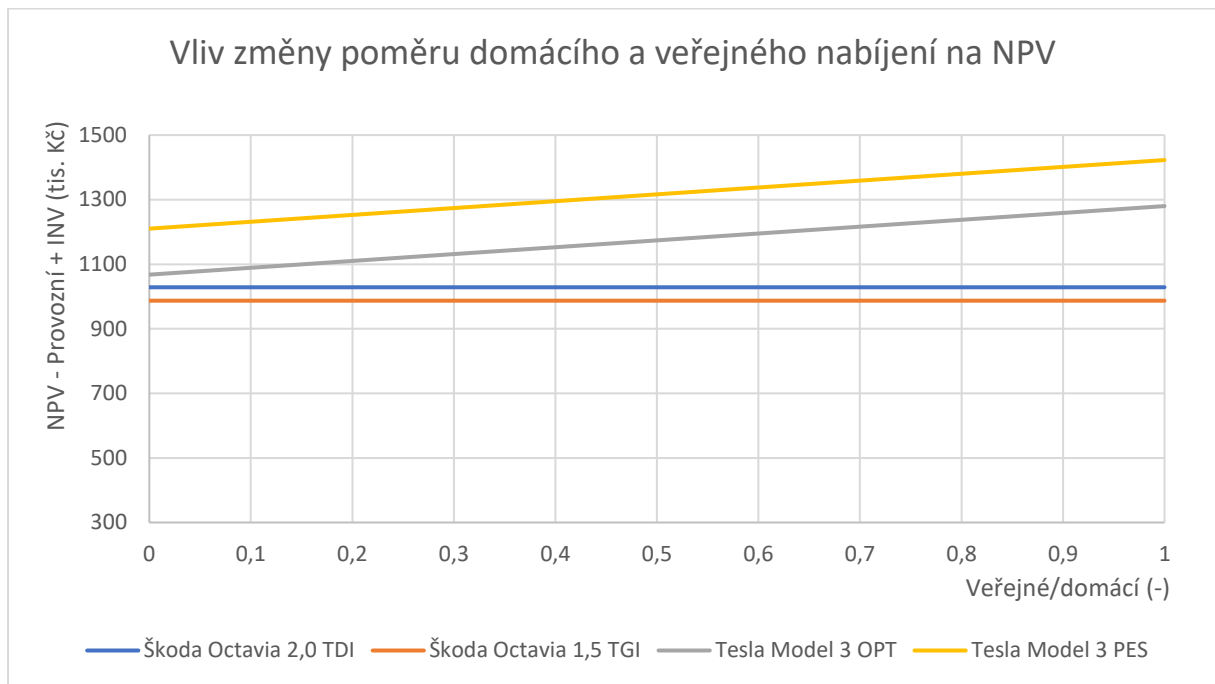
Graf 11: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV



Na grafické závislosti č.11 lze pozorovat, v jaké míře zasahuje výměna baterie do provozních nákladů elektromobilu. Nákladová křivka o modré stopě znázorňuje pesimistický scénář provozu, kde musí dojít k výměně trakčního akumulátoru z peněz rodinného rozpočtu. V takovém případě postačí meziroční růst cen vyšší než 4 % a celkové provozní náklady elektromobilu převýší provozní náklady ostatních pohonů. Nutno připomenout, že analýzu eskalace cen elektrické energie vztahují k rovnoměrnému dvouprocentnímu růstu cenových hladin plynu a nafty. Pokud by k výměně baterie během její životnosti nedošlo, tento optimistický scénář znázorňuje zelená křivka, provoz vozidla Tesla Model 3 by se stal nákladnějším až za hranicí růstu cen energií o 15 %.

Definovaný model provozu umožňuje majiteli elektromobilu využití pouze veřejného a domácího nabíjení elektromobilu. Krajní hodnoty grafické závislosti níže uvedené symbolizují čistě veřejné nebo domácí způsoby dobíjení. Krajní nulová hodnota na ose x znázorňuje situaci, ve které by majitel elektromobilu využíval čistě domácí způsob nabíjení. Výsledky práce naznačují, že domácí způsob nabíjení se řadí mezi ty ekonomicky nejvýhodnější. Proto s rostoucím procentuálním zastoupením domácího nabíjení značně klesá nákladové NPV elektromobilu. Pokud bychom vzali v úvahu optimistický scénář a situaci, kdy by majitel využíval čistě domácí způsob dobíjení, rozdíl mezi celkovým NPV vozidla Tesla Model 3 a Škoda Octavia 2,0 TDI tvoří přibližně 3 %. Navzdory tomu, že za popsaných okolností došlo k výraznému zvýhodnění elektromobilu, stále nedošlo k obměně pořadí z hlediska výhodnosti investic.

Graf 12: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV

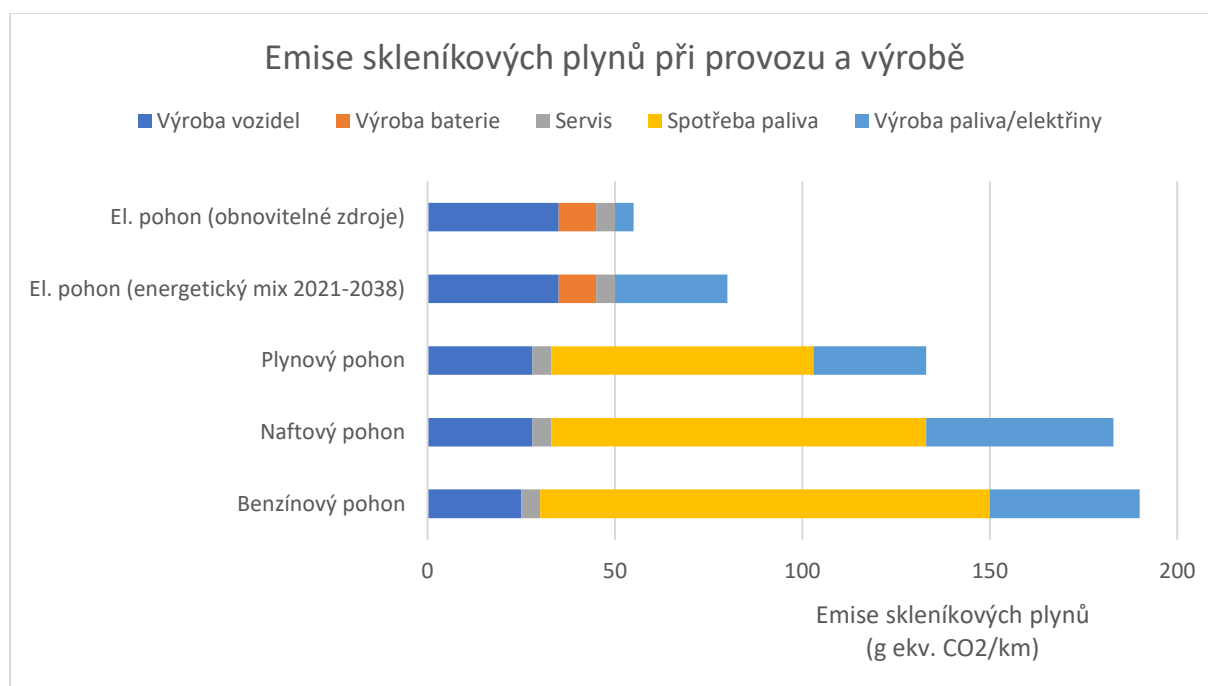


6. Porovnání dopadu vozidel na životní prostředí

Velmi diskutovaným aspektem silniční dopravy je zmírnění nepříznivých dopadů na lidský organismus a životní prostředí. Ze zmíněných důvodů je celosvětovým zájmem vyspělých států prosazovat strategie a opatření vedoucí ke snížení negativních dopadů dopravního sektoru na ovzduší a lidský organismus.

Při zkoumání problematiky ekologického dopadu provozu vozidel je nutné brát v potaz celý životní cyklus. Je potřeba zahrnout procesy od získávání základních surovin, včetně výroby, v případě elektromobilu je tato část doplněna výrobou baterie, až po provoz automobilu a následnou likvidaci. Statistiky a relevantní informace jsem čerpal z rozsáhlé studie výzkumné společnosti ICCT (International Council on Clean Transportation), která zkoumala produkci skleníkových plynů za celoživotního cyklu vozidel registrovaných v roce 2021 v oblasti Evropy, Asie a Spojených Států [27]. Studie zohledňuje vliv výroby a spotřeby pohonných hmot, průmyslovou výrobu vozidla a údržbu během provozu. Posuzovány byly také vodíkový a hybridní pohon, nicméně budu komentovat pouze pohon naftový, plynový a čistě elektrický pohon. V následující grafické závislosti je uveden výsledek studie porovnávající emise skleníkových plynů uvolněných během životního cyklu automobilu. Horizontální osa je popsána pomocí ekvivalentu CO₂ vztaženého na jeden kilometr. Tento číselný údaj popisuje množství oxidu uhličitého, které by mělo ekvivalentní příspěvek ke skleníkovému jevu, jako dané množství vyprodukovaných ostatních skleníkových plynů.

Graf 13: Přehled produkce skleníkových plynů během provozu a výroby vozidel [27]



Z výsledků studie vyplývá, že již dnes prodávané evropské elektromobily vykazují v porovnání s ostatními pohony nejnižší produkci skleníkových plynů. To vše za předpokladu, že jsou vozidla dobíjena elektrickou energií získanou z průměrného evropského energetického mixu v letech 2021-2038. Elektromobilitě tak může nahrávat fakt, že studie počítá v budoucnu s rostoucím zastoupením obnovitelných zdrojů výrobního portfolia. Vzhledem k tomu, že záleží na mnoha proměnných faktorech a rychlost transformace energetického sektoru je složité predikovat, je možné, že se reálný vývoj může od predikce studie lišit. Problematice uhlíkové náročnosti provozu elektromobilu se budu podrobněji

věnovat v podkapitole 6.2. Porovnáme-li pohonné technologie využívající spalovací a zážehový motor, dosahuje plynový pohon nejlepších výsledků. Tato skutečnost je způsobena především nižší produkcí skleníkových plynů při spalování paliva během provozu vozidla.

Problematika dopadu vozidel na životní prostředí je velice komplexní. Je potřeba brát také v úvahu zásah do přírody způsobený výrobou pohonných hmot a těžbou surovin potřebných k výrobě různých součástí a komponentů. V případě elektromobilů se jedná například o vzácné kovy, které jsou nedílnou součástí magnetů v motoru a bateriích. Existuje velké množství studií, které zkoumají environmentální zátěž životního cyklu automobilu, počínaje těžbou materiálů až po následnou likvidaci. V kapitole, která porovnává dopad vozidel na životní prostředí, se budu zabývat pouze uhlíkovou náročností výroby vozidla, jeho provozu a následné likvidace. Detailnější zkoumání problematiky je nad rámec mé bakalářské práce. V jednotlivých podkapitolách budu stručně charakterizovat podstatu zmíněných životních fází automobilu a jejich vliv na životní prostředí.

6.1 Výroba

Proces výroby vozidel za léta své existence postupně prošel modernizací a v současné době probíhá výhradně za použití výrobních automatizovaných linek, kde lidský pracovník zaujímá spíše kontrolní funkci. Proces sestavení vozidla začíná lisováním jednotlivých dílů, které jsou následně svařeny do uceleného celku karoserie. Svařená karoserie je nalakována a přesunuta do montážní haly. V montážní hale probíhá montáž interiérových a exteriérových prvků jako je motor, kola, volant a další. Jak při výrobě jednotlivých komponentů, tak při každé ze zmíněných fází výroby dochází k produkci oxidu uhličitého. V případě elektromobilu se ještě musí vzít v úvahu výroba baterie, spolu s těžbou potřebných vzácných kovů. Fakt, že je výroba elektromobilu emisně náročnější, potvrzuje také studie z roku 2017, která zkoumala uhlíkovou náročnost fáze výroby elektromobilu v porovnání se spalovacím motorem. Studie porovnává čistě elektrický pohon s benzínovým pohonem. Má práce se zabývá také provozem plynového pohonu, proto je potřeba pro účely porovnání zavést pár předpokladů a zjednodušení. Z výsledků studie společnosti ICCT vyplývá, že výroba plynového a benzínového pohonu má srovnatelný dopad na životní prostředí. Z technického hlediska fungují vozidla velmi podobně, systém výroby je srovnatelný a s ní spojený dopad na životní prostředí se příliš neliší. Proto provedu zjednodušení a zanedbám emisní rozdíly, které by mohly při výrobě vzniknout. Naftový pohon využívá vznětový motor, který tvoří hlavní rozdíl v emisní náročnosti výroby ve srovnání s plynovým pohonem. Vznětový motor zpravidla vykazuje vyšší hmotnost, což vede k použití více materiálu. Výroba vznětového motoru je proto dle studie náročnější přibližně o 20,8 %. [29] [30]

Tabulka 27: Produkce CO₂ při výrobě vozidla (kg) [30] [29]

Položka	Součásti	Pohon se zážehovým motorem	Pohon se vznětovým motorem	Elektrický pohon
Základní komponenty	Karosérie, interiér, exteriér a sklo	2767	2767	4393,5
	Podvozek (bez baterie)	1684,7	1684,7	2665,5
Speciální komponenty	Spojka, převodovka	617,4	617,4	455,2
	Hnací ústrojí	2092,5	2530	1179,1
	Elektrický startér	/	/	1324,7
Baterie a doplňky	Olověný akumulátor	24,5	24,5	15,1
	Lithium-iontová baterie	/	/	2788,8
	Provozní kapaliny	230,2	230,2	98,3
	Pneumatiky	677,1	677,1	677,1
Celkové množství CO₂ (kg)		9172,5	9610	14642,5

Z výsledků studie vyplývá, že během výroby elektromobilu je produkováno o 52,36 % větší množství CO₂ než v případě pohonu využívající vznětový motor, který v našem případě reprezentuje naftový pohon. Také v porovnání se zážehovým motorem, respektive plynovým pohonem, je produkce CO₂ o 59,63 % vyšší. Na základě výstupu zmíněných studií lze označit výrobu elektromobilu v porovnání s naftovým a plynovým pohonem za méně ekologickou. [30] [29]

6.2 Provoz

V této podkapitole analyzují dopad provozu vozidel na životní prostředí. Je potřeba si uvědomit, že jedním z řešených problémů provozu automobilů je produkce skleníkových plynů. Rostoucí koncentrace skleníkových plynů v atmosféře vede k oteplování planety, avšak nejedná se o jediný nepříznivý vliv provozu na okolí. Dalším problémem je produkce pevných prachových částic vlivem nedokonalého spalování paliva zážehového a vznětového motoru. Prachové částice ve formě popílku a sazí mají prokazatelně negativní vliv na zdraví lidského organismu. Z toho důvodu je zaváděn do moderních pohonů se spalovacími motory filtr pevných částic spolu se systémem vstřikovací roztok AdBlue do výfukového potrubí za účelem tento nepříznivý jev minimalizovat. V případě pohonu na stlačený zemní plyn dochází analogicky ke spalování paliva, avšak emise skleníkových plynů a pevných částic jsou nižší. Zemní plyn je totiž z většiny tvořen methanem, který obsahuje více vodíku a méně uhlíku. Tento poměr je u zemního plynu příznivější v porovnání s naftou a benzínem. [27]

Při provozu čistě elektrického pohonu nedochází k přímému spalování pohonných hmot, tudíž se ve vztahu k produkci pevných částic jedná o nejšetrnější vozidlo. Elektromobil je výrobcem označován jako lokálně bezemisní. To znamená, že během provozu neprodukuje emise a výfukové plyny. Nicméně není možné celý provoz považovat za zcela bezemisní. Elektrická energie potřebná k pohonu vozidla je vyráběna v současné době na území České republiky stále z velké části z fosilních zdrojů energie. To znamená, že během výroby elektrické energie, pokud se nejedná o čistě obnovitelné zdroje, vznikají stejně jako při spalování pohonných hmot emise. V následující tabulce je zobrazen energetický mix na území ČR za rok 2020. [31]

Tabulka 28: Energetický mix na území ČR v roce 2020 [31]

Zdroje energie	2020
Obnovitelné zdroje - Celkem	6,75 %
Sluneční	2,27 %
Větrné	0,43 %
Vodní	0,65 %
Biomasa	3,40 %
Fosilní zdroje - Celkem	52,50 %
Hnědé uhlí	40 %
Černé uhlí	2,66 %
Zemní plyn	9,61 %
Ropa a ropné produkty	0,11 %
Druhotné zdroje a ostatní	0,12 %
Jaderné zdroje - Celkem	40,75 %

Více než polovina energie byla vyrobena z fosilních paliv, tedy černého a hnědého uhlí a zemního plynu. Pokud je elektromobil nabitý elektrickou energií vyrobenou za uvedených okolností, nemůžu jako majitel elektromobilu prohlásit, že je provoz uhlíkově neutrální. Cílem transformace energetického sektoru je také postupem času snižovat procentuální zastoupení fosilních zdrojů energie, což povede ke snížení množství oxidu uhličitého vyprodukovaného během výroby.

Pro určení uhlíkové náročnosti elektromobilu je potřeba zavést pojem emisní faktor z výroby elektřiny. Emisní faktor je měrný ukazatel, popisující množství oxidu uhličitého vyprodukovaného při spalování určitého množství paliva. Pro účely výpočtu jsem použil emisní faktor z roku 2020 0,384 t

CO₂/MWh [32]. Číselná hodnota určuje množství oxidu uhličitého vzniklého při výrobě jedné MWh. Pokud znám spotřebu elektromobilu, vynásobením těchto dvou hodnot obdržím emise CO₂ na 100 kilometrů. V případě naftového a plynového agregátu budu vycházet z údajů uvedených výrobcem v technických specifikacích modelu.

Tabulka 29: Přehled produkce CO₂ v přepočtu na kilometr [3]

Emise CO ₂	Množství CO ₂ (g/km)
Škoda Octavia 2,0 TDI	122
Škoda Octavia 1,5 TGI	108,8
Tesla Model 3	61,44

V předchozí kapitole jsem se zabýval ekonomickou stránkou provozu vozidel, kde jsem uváděl hlavní náklady, které přímo souvisí s výdajovou stránkou rozpočtu majitele. V současné době se zvyšuje povědomí společnosti o vlivu dopravy na životní prostředí, což do určité míry také ovlivňuje výslednou volbu zákazníka. Vezmeme-li nákup automobilu z čistě ekologického hlediska, čím nižší emise během provozu vyprodukuje, tím větší zájem vzbuzuje u daných spotřebitelů. Abych mohl provést orientační ocenění emisí, je potřeba vyjít z ceny emisních povolenek ze systému EU ETS (European Union Emissions Trading System). Emisní povolenka je nástroj Evropské unie, zavedený za účelem zpoplatnění a monitorování vyprodukovaného množství emisí skleníkových plynů v rámci zkoumaných sektorů. Jedná se zejména o energetický, ropný a průmyslový sektor. Každý rok je vydáváno determinované množství emisních povolenek, které se v průběhu let postupně snižuje. Systém proto vede k průběžné redukci emisí skleníkových plynů vybraných sektorů. Cenová hladina emisní povolenky je časově proměnlivá, v rámci výpočtu budu vycházet z ceny 78 EUR/t CO₂ vztahující se k datu 7.4.2022 [32]. Roční částku uvádím v přepočtu na Kč. Následující tabulky popisují ocenění emisí zástupců jednotlivých pohonů.

Tabulka 30: Ocenění provozních emisí referenční rodiny A

Škoda Octavia 2,0 TDI	Emise CO ₂ (g/km)	Roční nájezd (km)	Množství CO ₂ (t)	Cena povolenky (€/t CO ₂)	Ocenění emisí (Kč/rok)
	111,4	20 000	2,2		80
Škoda Octavia 1,5 TGI	Emise CO ₂ (g/km)	Roční nájezd (km)	Množství CO ₂ (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	102,2	20 000	2,0	4 088	
Tesla Model 3	Emisní faktor výroby (t/MWh)	Spotřeba (MWh/rok)	Množství CO ₂ (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	0,384	3,2	1,2	2 458	

Tabulka 31: Ocenění provozních emisí referenční rodiny B

Škoda Octavia 2,0 TDI	Emise CO2 (q/km)	Roční nájezd (km)	Množství CO2 (t)	Cena povolenky (€/t CO2)	Ocenění emisí (Kč/rok)
	111,4	30000	3,3		80
Škoda Octavia 1,5 TGI	Emise CO2 (q/km)	Roční nájezd (km)	Množství CO2 (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	102,2	30000	3,1	6 132	
Tesla Model 3	Emisní faktor výroby (t/MWh)	Spotřeba (MWh/rok)	Množství CO2 (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	0,384	4,8	1,8	3 686	

Tabulka 32: Ocenění provozních emisí referenční rodiny C

Škoda Octavia 2,0 TDI	Emise CO2 (q/km)	Roční nájezd (km)	Produkce CO2 (t)	Cena povolenky (€/t CO2)	Ocenění emisí (Kč/rok)
	111,4	60000	6,7		80
Škoda Octavia 1,5 TGI	Emise CO2 (q/km)	Roční nájezd (km)	Množství CO2 (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	102,2	60000	6,1	12 264	
Tesla Model 3	Emisní faktor výroby (t/MWh)	Spotřeba (MWh/rok)	Množství CO2 (t)	Ocenění emisí (Kč/rok)	
	0,384	9,6	3,7	7 373	

6.3 Likvidace

Ve vztahu k řešení problematiky dopadu dopravy na životní prostředí je zásadní také smysluplná a šetrná likvidace vozidla, na kterou jsou v současné době kladeny vysoké nároky. Na specializovaných pracovištích dochází k demontáži, recyklaci nebezpečných látek, jako jsou olovené baterie, oleje a katalyzátory a k následnému slisování vozidla. Samotná likvidace automobilu se vznětovým, zážehovým a elektrickým motorem je obdobně náročná na produkci CO₂ [29]. Rozdíl však tvoří opět baterie elektromobilu. K tomu, abychom zamezili budoucímu nedostatku surovin, je potřeba řešit technickou a ekonomickou stránku recyklačních procesů. V případě recyklace mají větší potenciál vozidla s čistě elektrickým pohonem. Lithium-iontová baterie, která se již po ztrátě části své původní kapacity nedá použít k trakčním účelům, lze využít v aplikacích, ve kterých nejsou kladeny tak vysoké požadavky na technické vlastnosti baterie. Sekundární život baterií může spočívat ve využití ve více stacionárních aplikacích, kam například patří dodatečné úložiště elektrické energie, záložního zdroje nebo zdroje pro start ze tmy. Bateriová jednotka může ve zmíněných aplikacích sloužit dalších několik let. Po skončení životního cyklu baterie se za použití mechanických a chemických procesů vyseparují jednotlivé drahé kovy, které jsou nedílnou součástí baterie. Recyklované materiály jsou následně

použity pro výrobu nových součástí. Překážkou recyklace baterií však zatím zůstává nákladnost celého procesu. Lithium získané recyklací je totiž pro výrobce dražší než lithium, které lze získat klasickou těžbou. V současné době proto neprobíhá opětovný zisk drahých kovů z baterií ve větším měřítku, ale pouze u zanedbatelného množství elektromobilů.

7. Vícekriteriální analýza

Cílem kapitoly je popsat a následně zhodnotit možné výhody a nevýhody jednotlivých vozidel za použití vícekriteriální analýzy. Vícekriteriální analýza slouží k posouzení výhodnosti variant výběru z hlediska vyššího počtu někdy i navzájem protichůdných kritérií. Cenovou hladinu určených kritérií je složité stanovit a je tedy potřeba jiným způsobem popsat jejich vliv a podstatu pro rozhodování potenciálního zákazníka.

V první části kapitoly se budu věnovat definici výchozích kritérií a následnému stanovení vah vyjadřujících jejich významnost. Za účelem vyhodnocení je totiž nutné určit váhu reflektující požadavky jednotlivých uživatelů a relativní důležitost kritéria. Vzhledem k mým omezeným zkušenostem v pozici majitele vozidla jsem označil rozhodovatelem o důležitosti kritérií, respektive váhy kritéria, označit skupinu desíti zkušenějších respondentů. Důležitost kritérií je vyjádřena pomocí bodovací metody v bodovém rozmezí od 1 do 10, kde hodnota 10 indikuje maximální důležitost kritéria. Splnění jednotlivých kritérií budu hodnotit samostatně na základě dostupných materiálů a dat ve vztahu k problematice. Bodovací systém bude ve formě číselného bodování 1 až 5, přičemž hodnota 5 představuje vždy nejlepší hodnocení parametru. V rámci rešerše jsem čerpal z elektronicky dostupných výukových materiálů Masarykovy univerzity a bakalářské práce, která zkoumá čistě problematiku vícekriteriální analýzy a aplikace různých metod řešení. [33] [34]

7.1 Rozhodovací kritéria

V této podkapitole charakterizují mnou definovaná rozhodovací kritéria spolu s podstatnými informacemi ve vztahu k dané problematice. Jízdní projev jsem do kritérií nezahrnout. Jízdní projev automobilů je složité hodnotit, protože elektromotor vykazuje odlišnou momentovou a výkonovou charakteristiku ve srovnání s motorem spalovacím. Závisí tedy na individuálních preferencích a potřebách řidiče. Také jsem se rozhodl vynechat rozšířenost výbavy. Vybraná vozidla jsem nakonfiguroval takovým způsobem, aby za účelem ekonomického porovnání dosahovaly srovnatelné rozšířenosti výbavy. Při hodnocení dílčího splnění kritéria by docházelo k zanedbatelným rozdílům a k celkovému hodnocení analýzy by kritérium příliš nepřispělo. Provoz automobilu je v rámci vícekriteriální analýzy hodnocen z hlediska šesti definovaných kritérií. Konkrétně se jedná o dostupnost čerpacích a dobíjecích stanic, dojezd vozidla, ekologický aspekt, bezpečnostní kritérium, dostupnost náhradních a spotřebních dílů a velikosti zavazadlového prostoru.

7.1.1 Charakteristika kritérií

Dostupnost veřejných čerpacích/dobíjecích stanic

Pro každodenní provoz vozidla představuje dostupnost čerpacích a dobíjecích stanic klíčový parametr. Situace, kde je řidič nucen aktivně vyhledávat nejbližší stanici za předpokladu nedostatečně husté infrastruktury, vede k omezení komfortu a nepříjemnostem během jízdy. Počet čistě veřejných čerpacích a dobíjecích stanic jsem převzal z evidovaných dat Ministerstva průmyslu a obchodu za rok 2021.

Tabulka 33: Přehled veřejných čerpacích a dobíjecích stanic [35] [36]

Veřejné čerpací / dobíjecí stanice	Počet (ks)
Nafta/Benzín stanice	2 843
CNG stanice	186
Dobíjecí stanice	944

Z tabulky lze vyčíst, že v případě použití konvenčních pohonů se majitel vozidla může těšit z výrazně nejvyššího počtu dostupných čerpacích stanic. Navzdory tomu, že je v současné době na území České republiky nižší počet elektromobilů v porovnání s vozidly na stlačený plyn, je počet dobíjecích stanic vyšší. Infrastruktura plynových a dobíjecích stanic se v posledních letech značně vyvíjí, nicméně stále zdaleka nedosahuje rozšířenosti klasických čerpacích stanic.

Dojezd vozidla

V souvislosti s rozšiřováním alternativních pohonů je na problematiku celkového dojezdu kladena velká pozornost, proto jsem se rozhodl ji v rámci vícekritériální analýzy zahrnout. Při otázce dojezdu je akční rádius vozidel při reálném provozu závislý na dynamice jízdy, kvalitě silnic a schopnosti řidiče. Dojezd je jeden z parametrů, kde technologie čistě elektrických vozidel v porovnání s naftovým a plynovým pohonem zaostává.

Tabulka 34: Přehled dojezdů vozidel výběru [3] [7]

Dojezd	Vzdálenost (km)
Škoda Octavia 2,0 TDI	900
Škoda Octavia 1,5 TGI	700
Tesla Model 3	380

Bezpečnost

Důležitým parametrem osobních automobilů je zaručení bezpečnosti během provozu a v krizových situacích. Přítomnost bezpečnostních prvků ve formě senzorů, asistenční služby a airbagů mohou vést k úplnému zabránění nebo alespoň zmírnění následků kolize. Za použití dostupných moderních technologií jsou automobily stále pokročilejší v aktivní a pasivní bezpečnosti. Rozdíly mezi konkurečními společnostmi nejsou příliš markantní. Liší se zejména pokročilostí a počtem senzorů kontrolující stavy důležitých systémů a asistencí při řízení. V rámci kritéria jsem se proto rozhodl hodnotit pouze základní rozhraní, a to počet airbagů, přítomnost protiblokovacího systému ABS, systému rychlostní asistence ACC a systému stabilizace podvozku ESP. Do vypovídajících parametrů bezpečnosti jsem také zařadil nárazové zkoušky organizace EURO NCAP, která na základě nezávislých testů hodnotí úroveň ochrany pasažérů během srážky.

Tabulka 35: Přehled přítomnosti bezpečnostních prvků vozidel [37] [3] [38] [39]

Typ bezpečnostního prvku	Škoda Octavia	Škoda Octavia CNG	Tesla Model 3
Počet airbagů	8	8	8
NCAP test	5 hvězd	5 hvězd	5 hvězd
ABS systém	Ano	Ano	Ano
ESP systém	Ano	Ano	Ano
ACC systém	Ne	Ne	Ano

Dostupnost náhradních a spotřebních dílů

Další kritérium představuje dostupnost náhradních dílů. V případě dopravní kolize jsou náklady na opravu závislé na ceně konkrétního náhradního dílu. Obecně se cena náhradního dílu odvíjí od výrobního roku modelu, značky automobilu a také úrovně výbavy. Zákazník má v dnešní době možnost sice většinu komponentů objednat elektronicky, nicméně vlivem nedostatečné dostupnosti položek může dojít k zvýšení cenové hladiny a doručovací doby. Jelikož je složité hodnotit množství náhradních dílů na trhu, rozhodl jsem se vycházet ze statistik registrace nových vozů v ČR za rok 2021. Statistika reflektuje oblíbenost značky a tedy výsledky implikují výrobní a prodejní objem součástek. Není překvapením, že automobilka Škoda zcela dominovala a tvoří 34 % (70 946) objemu registrovaných vozidel. Konkrétně model Škoda Octavia je hned po modelu Fabia od stejnojmenného výrobce nejčastěji registrovaným automobilem za rok 2021, konkrétně ve výši 14 007 kusů. Plynová verze Škoda Octavia je sice zastoupena v menším počtu, ale technologie vznětového a zážehového motoru se příliš neliší. Čistě elektrických vozidel bylo evidováno pouze 2 646 kusů [40]. Za předpokladu standardního vývoje trhu lze konstatovat, že náhradní a spotřební díly modelu Škoda Octavia budou na trhu zastoupeny ve výrazně větším měřítku než díly Tesla Model 3.

Ekologické kritérium

Velmi diskutovaným aspektem silniční dopravy je zmírnění nepříznivých dopadů na lidský organismus a životní prostředí. Ekologickým dopadem jednotlivých automobilů se zabývám v širším kontextu v šesté kapitole, proto v rámci kritéria budu uvažovat pouze emise skleníkového plynu CO₂ produkovaného během provozu vozidla. Emise naftového a plynového pohonu vznikají při spalování paliva v motoru. V jejich případě budu vycházet z hodnot naměřených dle celosvětového standardu WLTP, které jsou zpravidla přímo uvedeny v technických specifikacích vozidel. V případě elektromobilu nedochází k přímému spalování paliva, nicméně elektromobil ke své jízdě spotřebovává elektrickou energii. Během výroby elektrické energie, pokud se nejedná o čisté obnovitelné zdroje, vznikají stejně jako při spalování pohonných hmot emise. Výsledná uhlíková stopa závisí na složení energetického mixu v dané zemi. Emisní faktor výroby elektrické energie v České republice je 0,384 t CO₂/MWh, přičemž číselná hodnota určuje množství oxidu uhličitého vzniklého při výrobě jedné MWh.

Tabulka 36: Přehled produkce CO₂ na kilometr [3]

Emise CO ₂	Množství CO ₂ (g/km)
Škoda Octavia 2,0 TDI	122
Škoda Octavia 1,5 TGI	108,8
Tesla Model 3	61,44

Velikost zavazadlového prostoru

Práce počítá s rodinným modelem provozu vozidel, což ze své podstaty vede k zohlednění objemu zavazadlového prostoru výběru vozidel. Potřeby jednotlivých rodin v reálném provozu jsou v tomto směru individuální, avšak v případě vícečlenné rodiny lze označit velikost zavazadlového prostoru za relevantní parametr. Elektromobil díky absenci objemného motoru a převodovky v přední části karosérie nabízí nákladový prostor jak v zadní části, tak v přední části vozidla. V případě plynového agregátu Škoda Octavia část využitelného prostoru zaujímá přídavná tlaková nádrž, což způsobí snížení užitého prostoru zhruba o čtvrtinu.

Tabulka 37: Přehled velikosti zavazadlového prostoru [37] [3]

Typ vozidla	Objem zavazadlového prostoru
Škoda Octavia 2,0 TDI	600 l
Škoda Octavia 1,5 TGI	455 l
Tesla Model 3	649 l

7.1.2 Bodové hodnocení

Bodové hodnocení splnění kritéria jsem provedl dvojím způsobem. V případě, kdy se nabízelo vycházet z numerických údajů (počet kilometrů, počet kusů atd.), jsem bodovou stupnicí převedl na bodovací intervaly, podle kterých jsem stanovil hodnocení. V druhém případě, kdy jsem neměl možnost vycházet z numerických údajů, jsem míru naplnění kritéria posoudil na základě dostupných zdrojů a informací charakterizujících varianty výběru. K takovému způsobu hodnocení jsem se uchýlil v případě dostupnosti náhradních dílů a bezpečnosti. Z bezpečnostního hlediska Tesla Model 3 splňuje základní rozhraní v plném rozsahu, kdežto oba zástupci automobilky Škoda naplňují mnou definovaný ve čtyřech případech z pěti. Závěrečné splnění kritéria je hodnoceno na základě počtu splněných parametrů. To znamená, že Tesla Model 3 dosáhla v rámci bezpečnostního kritéria pět bodů a modely Škoda po čtyřech bodech. Při hodnocení kritéria dostupnosti náhradních a spotřebních dílů budu vycházet ze statistiky uvedené v první části kapitoly [40]. Údaj implikuje zájem o objem spotřebních a náhradních dílů na trhu. Konkrétně model Škoda Octavia je druhým nejčastěji registrovaným automobilem za rok 2021. Plynová verze Škoda Octavia je sice zastoupena v menším počtu, ale technologie vznětového a zážehového motoru plynového a naftového agregátu se příliš neliší. Přihlédnu-li k tomu, že celkový počet registrací čistě elektrických vozidel nepřesahuje ani dvouprocentního podílu celkového objemu registrací, splnění kritéria dostupnosti náhradních dílů hodnotím následovně: Škoda Octavia 2,0 TDI obdržela pět bodů, Škoda Octavia 1,5 TGI čtyři body a vozidlo Tesla Model 3 pouze dva body.

Ve zbylých případech, kdy jsou známa konkrétní numerická data (km, ks, l, g/km), jsou body uděleny na základě bodovacího intervalu, který je určen následujícím způsobem [33]:

$$\text{Bodovací interval} = \frac{H_{max} - H_{min}}{R} \quad (5)$$

, kde H_{max} je nejvyšší uvedená hodnota, H_{min} je nejnižší uvedená hodnota a R je rozsah bodovací stupnice (v našem případě je to číslo pět).

V následující tabulce je uveden rozsah intervalů hodnocení. Všechna kritéria, kromě emisí CO₂, lze považovat za kritéria povahově maximalizační. To znamená, že čím interval dosahuje vyšších hodnot, tím je přiřazeno lepší bodové hodnocení. V případě kritéria Emise CO₂ je povaha minimalizační, jelikož lepšího hodnocení je dosaženo za menší emisní stopu.

Tabulka 38: Určení bodovacích intervalů

Bodovací intervaly	Veřejně dostupné stanice (ks)	Dojezd (km)	Velikost zavazadlového prostoru (l)	Emise CO₂ (g/km)	
Bodové hodnocení	5	3440-2793	900-796	649-610	79,184-68,48
	4	2793-2146	792-692	610-571	89,88-79,184
	3	2146-1499	692-588	571-532	100,59-89,88
	2	1499-852	588-484	532-493	111,29-100,59
	1	852-205	484-380	493-455	122-111,29
Povaha kritéria	Maximalizační	Maximalizační	Maximalizační	Minimalizační	

Na základě tabulky č.38 a uvedených statistik v kapitole 7.1.1 jsou přiřazeny body ze stupnice 0 až 5, kde hodnota 5 indikuje vždy nejlepší možný výsledek. Výsledné bodové hodnocení automobilů na základě splnění definovaných kritérií je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka č.42: Přiřazení bodového hodnocení

Bodové hodnocení	K1 Stanice	K2 Dojezd	K3 Prostor	K4 Bezpečnost	K5 Díly	K6 Emise
Škoda Octavia 2,0 TDI	5	5	4	5	4	1
Škoda Octavia 1,5 TGI	1	4	4	3	1	2
Tesla Model 3	2	1	5	1	5	5

, kde K1 je četnost veřejných čerpacích a dobýjecích stanic, K2 je dojezd vozidla, K3 je velikost zavazadlového prostoru, K4 je bezpečnostní kritérium, K5 je dostupnost spotřebních a náhradních dílů a K6 je ekologické kritérium.

7.2 Určení vah kritérií

Ve vztahu k definovaným kritériím jsem sestavil dotazník pro zjištění důležitosti a preferencí potenciálních majitelů plynového, naftového nebo čistě elektrického rodinného automobilu. Skupina respondentů sestává z desíti osob, přičemž je tvořena dospělými a zkušenými řidiči z okruhu přátel a rodiny. „Suma“ je tvořena součtem všech bodů, které jednotlivý respondent udělil všem kritériím. Tento údaj bude potřebný pro následný výpočet dílčích vah, který popisují v dalším odstavci. V následující tabulce jsou uvedeny výstupy dotazníku.

Tabulka 39: Udělení preferencí dle skupiny respondentů

Číslo respondenta	Kritérium						Suma
	Udělená váha (1-10)						
	K1 Stanice	K2 Dojezd	K3 Prostor	K4 Bezpečnost	K5 Díly	K6 Emise	
1	8	8	2	8	5	7	38
2	4	5	7	9	6	1	32
3	5	6	9	9	8	6	43
4	6	7	8	10	8	5	44
5	7	8	6	8	6	6	41
6	9	8	10	10	6	10	53
7	3	4	5	8	9	6	35
8	2	9	8	9	6	5	39
9	6	6	7	10	6	6	41
10	6	9	9	7	8	7	45

Udělené preference respondentů využijí k určení dílčí váhy důležitosti. Provedením podílu součtu dílčích vah konkrétního kritéria a počtu dotazovaných osob obdržím výslednou váhu konkrétního kritéria dle vztahu [33]:

$$p = \frac{\sum_{r=1}^q p_r}{q} \quad (6)$$

, kde p je výsledná váha důležitosti kritéria, q je počet respondentů a sumace p_r je součet všech dílčích vah důležitosti konkrétního kritéria.

Pro objasnění celého postupu zde uvedu příklad výpočtu kritéria K1 (četnost veřejných čerpacích a dobíjecích stanic). Dílčí hodnota váhy daného kritéria se stanoví tak, že provedu podíl mezi počtem bodů udělených respondentem č.1 až č.10 a celkovým součtem bodů, které respondent přiřadil ke všem kritériím.

$$p_{r(K1)} = \frac{5}{38} + \frac{4}{31} + \dots + \frac{6}{38} = 1,356$$

Součet všech dílčích vah kritéria K1 je vydělen počtem respondentů (v našem případě desíti) a uvádí výslednou váhu pro kritérium četnosti veřejných čerpacích a dobíjecích stanic:

$$p = \frac{p_r}{q} = \frac{1,35}{10} = 0,136$$

Provedením výpočtu dle popsaného postupu obdržím výsledné váhy důležitosti (při obecném zápisu p_r) jednotlivých kritérií, jejichž součet se musí rovnat jedné:

Tabulka 40: Ucelený přehled vah jednotlivých kritérií

Kritérium	K1 Stanice	K2 Dojezd	K3 Prostor	K4 Bezpečnost	K5 Díly	K6 Emise	Součet
Váha kritéria	0,135	0,170	0,172	0,217	0,166	0,141	1

7.3 Vyhodnocení

Provoz automobilu je v rámci vícekriteriální analýzy hodnocen z hlediska šesti definovaných kritérií, popsanych v první části této kapitoly. Konkrétně se jedná o dostupnost čerpacích a dobíjecích stanic, dojezd vozidla, ekologické hledisko, bezpečnostní kritérium, dostupnost náhradních a spotřebních dílů a velikosti zavazadlového prostoru.

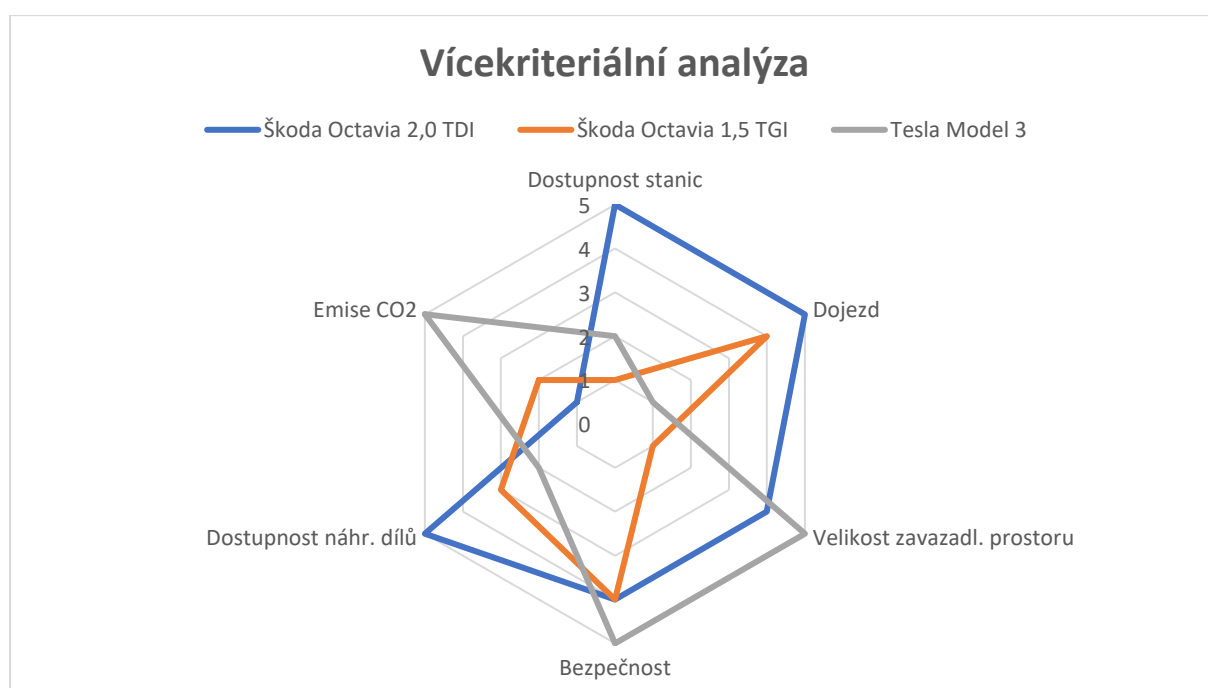
Poslední fáze výpočtu spočívá v prostém součinu váhy důležitosti kritéria s příslušným bodovým ohodnocením kritéria. Sloupec „Výsledek“ popisuje pouhý součet hodnot v příslušném řádku. V následující tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty rozhodující o konečném pořadí variant.

Tabulka 41: Vyhodnocení vícekriteriální analýzy

Vyhodnocení	K1 Stanice	K2 Dojezd	K3 Prostor	K4 Bezpečnost	K5 Díly	K6 Emise	Výsledek	Pořadí
Škoda Octavia 2,0 TDI	0,67	0,85	0,69	0,87	0,83	0,14	4,05	1.
Škoda Octavia 1,5 TGI	0,13	0,68	0,17	0,87	0,50	0,28	2,63	3.
Tesla Model 3	0,27	0,17	0,86	1,09	0,33	0,70	3,42	2.
Váha kritéria	0,13	0,17	0,17	0,22	0,17	0,14		

Na základě uvedené tabulky je zřejmé, že nejvýhodnější variantou z hlediska vícekriteriálního hodnocení je vozidlo Škoda Octavia 2,0 TDI. Následuje zástupce čistě elektrického vozidla Tesla Model 3 a nejméně vhodnou variantu reprezentuje plynový agregát. Určujícím výstupem vícekriteriálního hodnocení je také hvězdicová grafická závislost. Plocha grafické závislosti reprezentuje všestrannost a vhodnost využití daného automobilu, přičemž čím je větší obsah plochy, tím se jedná o vhodnější variantu.

Graf 14: Hvězdicová charakteristika vícekriteriální analýzy



Jak je patrné z grafu, naftový agregát modelu Škoda Octavia 2,0 TDI jednoznačně dominuje v oblastech dojezdu, dostupnosti čerpacích stanic a dostupnosti náhradních dílů. Elektromobil od společnosti Tesla vyniká v bezpečnosti, ve velikosti zavazadlového prostoru a produkuje nejmenší množství emisí. Naopak ve vztahu k dostupnosti náhradních dílů, dobíjecích stanic a dojezdu je v porovnání s naftovým agregátem slabší. Na základě definovaných kritérií je z hlediska vícekritériální analýzy nejvhodnější variantou výběru Škoda Octavia 2,0 TDI, po ní následuje Tesla Model 3 a vozidlo Škoda Octavia 1,5 TGI si vedlo nejhůře.

8. Závěr

V současné době je kladen stále větší důraz na omezení tvorby emisí a škodlivých látek vlivem dopravy. Tato skutečnost vede k rozšíření a zdokonalování technologií alternativních pohonů. Za účelem minimalizace negativních účinků na zdraví člověka a životní prostředí přistupuje Evropská unie ke zpřísnění emisních limitů vztažených pro nově registrovaná vozidla. Dokonce se diskutuje o možnostech úplného zákazu výroby spalovacích motorů. Tímto je vyvíjen tlak na automobilové společnosti, které pro splnění požadavku musí přejít na zdokonalení konvenčních pohonů nebo postupně zvyšovat zastoupení nízkoemisních automobilů na trhu. V bakalářské práci se proto věnuji zkoumání provozu alternativního čistě elektrického a plynového pohonu ve srovnání s konvenčním naftovým pohonem. Mezi zástupce různých pohonů jsem vybral vozidla Škoda Octavia, konkrétně v plynovém a naftovém provedení, a čistě elektrické vozidlo Tesla Model 3. Zmíněné modely porovnávám z ekonomického, ekologického a uživatelského hlediska za předpokladu různých provozních scénářů. Pro znázornění odlišných provozních modelů jsem definoval referenční rodiny, lišící se ročním nájezdem a stylem života.

Pro budoucího majitele je při výběru vozidla relevantní zohlednit ekonomickou stránku. Ve všech zkoumaných modelech lze na základě kritérií ekonomické efektivity NPV a RCF označit za ekonomicky nejméně výhodnou variantu výběru vozidla Tesla Model 3, za nejvýhodnější pak Škodu Octavia 1,5 TGI. Navzdory tomu, že elektromobil vykazuje nejnižší provozní náklady, pořizovací cena vozidla je o téměř 72 % vyšší v porovnání s vozidlem Škoda Octavia 2,0 TDI. Ekonomicky nejvýhodnější investici proto tvoří plynový agregát, který má provozní náklady v porovnání s naftovým protějškem a zároveň nejnižší pořizovací cenou. Citlivostní analýza ukázala, že u elektromobilu roste ekonomická výhodnost s mírou jeho využívání. Nižší provozní náklady jsou totiž schopny vykompenzovat vysokou počáteční investici až po delším a častějším využívání vozidla. Vyšší míra využití také přispívá ke zkrácení životnosti komponentů vozidla. V případě elektromobilu se může jednat také o životnost trakční baterie. To, že výměna trakční baterie představuje nezanedbatelnou položku provozních nákladů, potvrzuje pesimistický scénář referenční rodiny s ročním nájezdem 60 000 kilometrů, kde vlivem nákladné výměny klesla celková ekonomická výhodnost o více než 10 %.

Mezi překážky cenové dostupnosti elektromobilu lze zařadit cenu baterií a potřebu vzácných kovů při její výrobě. Tyto faktory úzce souvisí s výslednou pořizovací cenou elektrických vozidel. Trakční lithium-iontová baterie je vlivem optimalizace výrobních postupů a s přibývajícím počtem výrobců v poslední dekádě několikanásobně levnější. Tato skutečnost přináší na trh cenově a uživatelsky atraktivnější modely elektromobilů s vyšším dojezdem. Překážkou cenové dostupnosti elektromobilů však zůstává závislost na vzácných kovech, které představují nedílnou součástí magnetů v motoru a bateriích. S možným postupným nedostatkem může dojít k ovlivnění finanční dostupnosti elektromobilů na trhu a k zpomalení nebo úplnému zastavení trendu snižování cen.

Během výběru vozidla hraje významnou roli také uživatelský aspekt. Způsob využití automobilu je individuální a osobní preference se liší u každého uživatele. Jelikož uvažuji zejména rodinný provoz vozidel, rozhodl jsem se v rámci analýzy zohlednit kritérium dostupnosti čerpacích a dobíjecích stanic, dojezdu vozidla, environmentální zátěže, bezpečnostní kritérium, dostupnost náhradních a spotřebních dílů a velikosti zavazadlového prostoru. Analýza ukázala, že Škoda Octavia 2,0 TDI jednoznačně dominuje v oblastech dojezdu, dostupnosti čerpacích stanic a dostupnosti náhradních dílů. Elektromobil od společnosti Tesla vyniká v bezpečnosti, ve velikosti zavazadlového prostoru a produkuje nejmenší množství emisí. Naopak ve vztahu k dostupnosti náhradních dílů, dobíjecích stanic a dojezdu je v porovnání s naftovým agregátem horší. Na základě definovaných kritérií je z hlediska vícekritériální analýzy nejvhodnější variantou Škoda Octavia 2,0 TDI, po níž následuje čistě elektrické vozidlo a vozidlo Škoda Octavia 1,5 TGI skončilo poslední.

Vzhledem k tomu, že se v současné době zvyšuje povědomí společnosti o negativním vlivu dopravy na životní prostředí, může tato skutečnost do určité míry ovlivnit výslednou volbu zákazníka. Problematika znečištění životního prostředí vlivem dopravy je velice komplexní, proto jsem se ve svém porovnání vymežil pouze na fázi výroby, provozu a likvidace. Elektromobil dosahuje nejvyšší environmentální zátěže během výroby, ta je však vykompenzována nižší produkcí emisí při provozu. Provozní emise elektromobilu závisí na aktuálním energetickém mixu země, jakým způsobem je energie vyráběna. Pokud vezmeme v úvahu současný energetický mix České republiky, je na tom elektromobil nejlépe. V budoucnu elektromobilitě nahrává fakt, že probíhá transformace energetického sektoru s cílem zvýšení zastoupení nízkoemisních a obnovitelných zdrojů energie, což povede ke snížení množství emisí vyprodukovaných během výroby elektrické energie.

Výsledek práce ukázal, že každé vozidlo z definovaného výběru je pomyslným vítězem v určité kategorii. Z ekonomického hlediska je v každé referenční rodině nejvýhodnější plynový pohon, z ekologického hlediska zase čistě elektrický pohon a na základě většiny definovaných uživatelských kritérií je vítězem naftový pohon. Každý nový majitel si pořizuje automobil s takovým pohonem, který je mu bližší. Zůstává také na svobodném rozhodnutí majitele, jaká hlediska a kritéria výběru zvolí. Budoucí zpřísnování emisních limitů však může výběr zákazníka ovlivnit. Nacházíme se v době transformace osobní dopravy a rozvoje alternativních pohonů, které úzce souvisí s novými způsoby získávání energií a transformací světové energetiky. Je tedy nezbytné celou oblast sledovat a získávat informace, abychom se mohli na tuto blízkou budoucnost připravit.

Seznam zdrojů

- [1] EVROPSKÝ PARLAMENT. Nařízení evropského parlamentu a rady, kterým se stanoví výkonnostní normy pro emise CO₂ pro nové osobní automobily. *Rada Evropské unie* [online]. Brusel, 2019 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-6-2019-INIT/cs/pdf>
- [2] CARLIER, Mathilde. Best-selling plug-in electric vehicle models worldwide in 2020. *Statista* [online]. 2021 [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/960121/sales-of-all-electric-vehicles-worldwide-by-model/>
- [3] ŠKODA AUTO. *Technické specifikace [katalog výrobce]* [online]. 2021 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.skoda-auto.cz/_doc/760c63e9-64a9-47fd-9fd2-7afc6fe82f47
- [4] Nová Škoda Octavia 2.0 TDI. In: *Auta pod lupou* [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <http://autapodlupou.cz/nova-skoda-octavia-2-0-tdi-co-je-dobre-a-co-se-nepovedlo/>
- [5] ŠKODA AUTO. Technické specifikace [katalog výrobce]. In: *Škoda* [online]. 2021 [cit. 2021-11-10].
- [6] Škoda Octavia G-Tec 1.5 TGI 96 kW. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/skoda-octavia-g-tec-1-5-tgi-96-kw-setrit-jde-i-bez-baterek-137396>
- [7] Tesla Model 3. *Electric vehicle database* [online]. [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3>
- [8] Záruka na vozidlo. *Tesla: Podpora* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_CZ/support/vehicle-warranty
- [9] TURKSOY, YILMAZ a TEKE. Overview of battery charger topologies in plug-in electric and hybrid electric vehicles. *ResearchGate* [online]. Famagusta, N. Cyprus, 2018 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327422059_OVERVIEW_OF_BATTERY_CHARGER_TOPOLOGIES_IN_PLUG-IN_ELECTRIC_AND_HYBRID_ELECTRIC_VEHICLES
- [10] FRITH, Dr. James a Colin MCKERRACHER. Electric Vehicle Outlook 2021. *BloombergNEF* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://about.newenergyfinance.com/electric-vehicle-outlook/>
- [11] KEIL, Peter, Simon SCHUSTER, Holger HESSE, Arunachala RAGHAVENDRA a Andreas JOSSEN. Lifetime Analyses of Lithium-Ion EV Batteries. *ResearchGate* [online]. Singapore [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286242928_Lifetime_Analyses_of_Lithium-Ion_EV_Batteries
- [12] THE MOBILITY HOUSE. Charging cable and plug types. *The mobility house* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.mobilityhouse.com/int_en/knowledge-center/charging-cable-and-plug-types
- [13] SAE J1772. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J1772

- [14] EV EXPERT. Typy konektorů pro nabíjení EV ve světě. *EV Expert* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/typy-konektoru-pro-nabijeni-ev-ve-svete>
- [15] FERRARI, Lorenzo. Charging modes for electric vehicles. *Daze technology* [online]. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.dazetechnology.com/charging-modes-for-ev/>
- [16] SCHNEIDER ELECTRIC. Připojení systému k nabíjecí stanici – klíčový prvek pro elektromobily. *Schneider Electric* [online]. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: http://www.smartev.cz/wp-content/uploads/2017/02/Schneider_teorie.pdf
- [17] TESLA. Impact Report 2020. *Tesla* [online]. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.tesla.com/ns_videos/2020-tesla-impact-report.pdf
- [18] Diskontní sazba. *Středoevropské centrum pro finance a management* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <http://www.finance-management.cz/080vypisPojmu.php?IdPojPass=116>
- [19] Inflace, spotřebitelské ceny. *Český statistický úřad* [online]. Veřejná databáze ČSÚ [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/inflace_spotrebitelske_ceny
- [20] ŘEZNÍČEK, Ondřej. *Ekonomické a provozní srovnání elektromobilů s konvenčními automobily* [online]. Praha, 2016 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68261/F6-DP-2016-Reznicek-Ondrej-DP-ONDREJ-REZNICEK.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Říha, Ph.D.
- [21] ČESKÝ PLYNÁRENSKÝ SVAZ, ed. Vývoj průměrných cen: CNG – benzín – nafta. *CNG 4 You* [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/kolik-to-stoji/vyvoj-cen-cng-v-cr-a-dalsich-paliv.html>
- [22] ERÚ. Vyjádření Energetického regulačního úřadu k cenám dodávky elektřiny. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/-/vyjadreni-energetickeho-regulacniho-uradu-k-cenam-dodavky-elektri-1>
- [23] ČEZ PRODEJ A.S. Elektřina na 3 roky v akci. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2021/moo/web_new-cenik_elektrina-na-3-rok-v-akci_moo_202110_cezdi.pdf
- [24] Analýza složení vozidlového parku v návaznosti na Národní akční plán čisté mobility: [stav k 30.6.2021]. *Ministerstvo dopravy České republiky* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Strategie/Mobilita/Analyza-slozeni-vozdlovehoparku/2021-06-30-NAP-CM-Analyza-slozeni-vozdlovehoparku-CR.pdf.aspx>
- [25] Ceník dobíjení vozidel: (platnost od 1. 4. 2022). *PRE: PRE Mobilia* [online]. Praha [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.premobilita.cz/cs/dobijeni-elektromobilu/dobijeni-na-prepoint/chci-dobijet-na-prepoint/chci-dobijet-pravidelne/cenik-dobijeni/>
- [26] Obchodní podmínky služby elektromobilita. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.futurego.cz/file/edee/futurego/prilohy/vseobecne-obchodni-podminky-a-cenik-platneod-1.1.2022.pdf>
- [27] BIEKER, Georg. A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emission of combustion engine and electric passenger cars. *Icct: The international council on clean transportation*

- [online]. 2021 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z:
https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
- [28] SCARLAT, PRUSSI a PADELLA. Quantification of the carbon intensity of electricity produced and used in Europe. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117901>
- [29] KAWAMOTO, MOCHIZUKI, MORIGUCHI a NAKANO. Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/333046826_Estimation_of_CO2_Emissions_of_Internal_Combustion_Engine_Vehicle_and_Battery_Electric_Vehicle_Using_LCA
- [30] QIAO, ZHAO, LIU, JIANG a HAO. Comparative Study on Life Cycle CO2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.827>
- [31] Národní energetický mix. *OTE* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [32] Emisní faktor CO2 z výroby elektřiny za léta 2010–2021. *Ministerstvo průmyslu a obchodu: Energetika* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z:
https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2021--260559/
- [33] VOBORNÍK, Václav. *Aplikace vícekriteriálního rozhodování ve společnosti CNC Voborník, s.r.o. CNC* [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79902/F2-BP-2018-Vobornik-Vaclav-Vaclav%20Vobornik%20BP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Ladislav Vaniš.
- [34] SOUKOPOVÁ, Jana. Vícekriteriální metody hodnocení: Veřejné zakázky a veřejné projekty a jejich hodnocení. *IS MUNI: Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MKV_VZVP/um/33149329/Studijni_text_metody_vicekriteria_lniho_rozhodovani.pdf
- [35] Evidence čerpacích stanic pohonných hmot ČR: Zpráva o aktualizaci a stavu. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2021 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z:
<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/tuha-paliva/2021/4/Zprava-o-aktualizaci-a-stavu-Evidence-cerpacich-stanic-pohonnych-hmot-v-CR-k-9-4-2021.pdf>
- [36] Seznam veřejných dobíjecích stanic: stav k 31. 12. 2021. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z:
<https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/statistika-a-evidence-cerpacich-a-dobijecich-stanic/seznam-verejnych-dobijecich-stanic--stav-k-31--12--2021--266147/>
- [37] TESLA. Model 3 Owner's Manual. *Tesla* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z:
https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_kr/

- [38] Škoda Octavia with standart equipment. *EURO NCAP: Ratings and rewards* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/67244/euroncap-2019-%C5%A1koda-octavia-datasheet.pdf>
- [39] Tesla Model 3: Standard Safety Equipment. *EURO NCAP: Ratings and rewards* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/55749/euroncap-2019-tesla-model-3-datasheet.pdf>
- [40] Grafy a tabulky ke statistice vozidel registrovaných v ČR: období 1-12/2021. *SDA SCIA: Svaz Dovozců Automobilů* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://portal.sda-cia.cz/clanky/download/2022_01_tiskovka-2021-12_grafy.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Model Škoda Octavia (2,0 TDI) [4]	4
Obrázek 2: Model Škoda Octavia 1,5 TGI [6]	5
Obrázek 3: Tesla Model 3 [7]	6
Obrázek 4: Typ 1 (J1772) [13]	11
Obrázek 5: Typ 2 Mennekes [14]	11
Obrázek 6: GB/T [14]	11
Obrázek 7: Tesla US konektor [14]	12
Obrázek 8: CCS Typ 1 (vlevo), CCS Typ 2 (vpravo) [14]	13
Obrázek 9: CHAdemo [14]	13
Obrázek 10: GB/T standard [14]	13

Seznam grafů

Graf 1: Vývoj objemově vážené cenové hladiny baterií [10]	9
Graf 2: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV	34
Graf 3: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV	35
Graf 4: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV	35
Graf 5: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV	36
Graf 6: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV	37
Graf 7: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV	37
Graf 8: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV	38
Graf 9: Vliv volby ročního nájezdu na nákladové NPV	39
Graf 10: Vliv volby diskontní sazby na nákladové NPV	39
Graf 11: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV	40
Graf 12: Vliv změny růstu cen elektrické energie na provozní nákladové NPV	41
Graf 13: Přehled produkce skleníkových plynů během provozu a výroby vozidel [27]	42
Graf 14: Hvězdicová charakteristika vícekritériální analýzy	55

Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické parametry vozidla [3]	4
Tabulka 2: Technické parametry vozidla [3]	5
Tabulka 3: Technické parametry vozidla [7]	6
Tabulka 4: Výkonové třídy nabíjení [9].....	8
Tabulka 5: Přehled možností střídavého nabíjení Tesla Model 3 [7]	12
Tabulka 6: Přehled možností stejnosměrného nabíjení Tesla Model 3 [7]	14
Tabulka 7: Shrnutí parametrů referenční rodiny A.....	16
Tabulka 8: Shrnutí definovaných parametrů referenční rodiny B.....	16
Tabulka 9: Shrnutí definovaných parametrů referenční rodiny C.....	17
Tabulka 10: Náklady spojené s pořízením nabíjecí stanice Wallbox.....	19
Tabulka 12: Odhad tržní ceny ojetých vozidel	20
Tabulka 13: Roční vývoj cenové hladiny nafty [21].....	22
Tabulka 14: Přehled palivových nákladů referenčních rodin	23
Tabulka 15: Roční vývoj cenové hladiny CNG [21]	23
Tabulka 16: Přehled palivových nákladů referenčních rodin	24
Tabulka 17: Výpočet nákladů na elektřinu v rámci domácího nabíjení s DPH [23]	25
Tabulka 18: Ceník veřejného dobíjení včetně DPH [25].....	26
Tabulka 19: Ceník veřejného dobíjení včetně DPH [26].....	27
Tabulka 20: Přehled cenových hladin balíčku povinného ručení s havarijním pojištěním	29
Tabulka 21: Parametry referenční rodiny A.....	31
Tabulka 22: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny A	31
Tabulka 23: Parametry referenční rodiny B.....	31
Tabulka 24: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny B.....	32
Tabulka 25: Parametry referenční rodiny C.....	32
Tabulka 26: Shrnutí výsledků ekonomického modelu referenční rodiny C.....	33
Tabulka 27: Produkce CO ₂ při výrobě vozidla (kg) [30] [29].....	44
Tabulka 28: Energetický mix na území ČR v roce 2020 [31].....	45
Tabulka 29: Přehled produkce CO ₂ v přepočtu na kilometr [3].....	46
Tabulka 30: Ocenění provozních emisí referenční rodiny A	46
Tabulka 31: Ocenění provozních emisí referenční rodiny B	47
Tabulka 32: Ocenění provozních emisí referenční rodiny C	47
Tabulka 33: Přehled veřejných čerpacích a dobíjecích stanic [35] [36]	50
Tabulka 34: Přehled dojezdů vozidel výběru [3] [7]	50
Tabulka 35: Přehled přítomnosti bezpečnostních prvků vozidel [37] [3] [38] [39].....	50
Tabulka 36: Přehled produkce CO ₂ na kilometr [3].....	51
Tabulka 37: Přehled velikostí zavazadlového prostoru [37] [3]	52
Tabulka 38: Určení bodovacích intervalů.....	53
Tabulka 39: Udělení preferencí dle skupiny respondentů.....	54
Tabulka 40: Ucelený přehled vah jednotlivých kritérií.....	54
Tabulka 41: Vyhodnocení vícekritériální analýzy	55