

# Návrh algoritmů výpočtu dojezdu a optimalizace řízení toku energií pro elektrická vozidla

Design of range calculation algorithms and optimization of energy flow control for electric vehicles

Jan Dedek

Disertační práce

Školitel: doc. Ing. Jan Žídek, CSc.

Ostrava, 2022

## **Abstrakt a přínos práce**

Práce se zaměřuje na výpočet dojezdu bateriových elektrických vozidel a řízení toku energií v nich. Činí tak pomocí pokročilých algoritmů založených na kombinaci matematického a datového modelu. Tato metoda by se mohla stát velmi účinným a nezbytným nástrojem k přijetí elektromobility širokou veřejností a k odstranění strachu z nízkého dojezdu. Největší výzvou v řešení tohoto problému je vytvoření dostatečně přesného a zároveň robustního algoritmu. Práce se zaměřuje na vývoj algoritmu pomocí datového a matematického modelu. Tento algoritmus dovede nejen přesně určit dojezd za daných podmínek, ale rovněž je schopen řídit energii ve vozidle tak, aby bylo dosaženo cíle trasy dle nastaveného optimalizačního kritéria. Práce zahrnuje mimo jiné shrnutí této relativně nové problematiky, vývoj modelů, vývoj a nasazení algoritmu a srovnání s reálnými daty.

## **Klíčová slova**

Bateriové elektrické vozidlo, výpočet dojezdu, model soustavy, toky energií.

## **Abstract and Contributions**

This thesis focuses on the calculation of the range of battery electric vehicles and the control of energy flow in them. It does so by using advanced algorithms based on a combination of mathematical and data model. This method could become a highly effective and necessary tool for the acceptance of electromobility by the general public and to eliminate the range anxiety. The greatest challenge in solving this problem is to create a sufficiently accurate and at the same time robust algorithm. This thesis focuses on the development of an algorithm using data and a mathematical model. This algorithm can accurately determine the range under given conditions in addition to that is also able to control the energy in the vehicle so that the destination of the route is always reached according to the set optimization criteria. This thesis includes a summary of this relatively new issue, the development of model, the development and deployment of algorithms and its comparisons with real data.

## **Keywords**

Battery electric vehicle, range estimation, plant model, energy flow.

## Poděkování

Dovolte mi úvodem této práce poděkovat lidem, kteří byli její součástí, a také lidem, kteří mi poskytli tu výsadu studovat a dostat se až k cíli doktorského studia.

Velké díky patří mému školiteli docentu Janu Žídkovi, který si mě vzal pod svá křídla a směřoval mé kroky v dlouhých pěti letech mého doktorského studia. Poděkování patří patronovi mé stáže ve Finsku docentu (Associate Professor) Heikki Liimatainenovi, za jeho podporu a rady.

Děkuji Filipovi Nowakovi a inženýru Janu Kocmáňkovi za pomoc při realizaci programu „Speedgetter“. Děkuji inženýru Tomáši Kleinovi za zprostředkování měření na válcové zkušebně. Děkuji Dr. Sikorovi z centra Enet za poskytnutá telemetrická data. Děkuji všem z českého statistického úřadu, ministerstev dopravy, průmyslu a obchodu a distributorům elektrické energie, zejména Zuzaně Kubínové z firmy ČEZ za cenná data. Velké poděkování patří Dr. Slaninovi za pomoc při studiu doktorátu, projekty a pomoc při tvorbě článků.

Navzdory podpoře velkého množství odborníků by mé studium bylo obtížné bez přátel a rodiny. Z rodiny bych rád zmínil Babičku a Petra Miku, kteří mě podporovali napříč celým mým studiem. Děkuji Terce za podporu v prvních letech doktorského studia. Z přátel a kolegů jsou to Matěj, Kuba, Tom, Marťa, Lenka, Radana, Jindra a Petr, díky za podporu, kritiku a společně strávený pracovní i volný čas.

Velké poděkování patří jazykovým korektorům mé práce. Děkuji Dr. Vavříkové, Haně Mužné a školiteli. Poděkování za podporu v průběhu vzniku všech mých absolventských prací patří docentu Dvorskému, za výuku L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xu a šablonu Diploma. Rovněž děkuji všem dalším lidem, kteří připomínkovali text v průběhu jeho vzniku.

Mé největší poděkování patří každému člověku, bez ohledu na akademickou hodnost, který byl nebo je součástí mého vzdělání.

Tato disertační práce byla podpořena z rozpočtu Moravskoslezského kraje v rámci projektu „Podpora talentovaných studentů doktorského studia na VŠB-TUO“ (č.s.: 04766/2017/RRC). Dále byla podpořena z projektů SGS „Virtuální instrumentace pro oblast měření a testování“ VIII SP2021/123. Tato práce je také podporována projektem „E-Town – Vývoj superlehkých malých elektrických vozidel s dlouhým dojezdem pro mezigenerační koncepce městské e-mobility využívající inteligentní infrastrukturu“ LTE220001.



# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Cíle doktorské práce</b>	<b>14</b>
2.1 Pozadí výzkumu . . . . .	14
2.2 Sociologické a technické překážky bránící rozšíření BEV . . . . .	15
2.3 Rešerše historie BEV, historický dojezd a způsob jeho výpočtu . . . . .	15
2.4 Identifikace BEV a určení faktorů ovlivňujících dojezd . . . . .	16
2.5 Vývoj algoritmu výpočtu dojezdu BEV s řízením toků energií . . . . .	16
2.6 Ověření přesnosti algoritmu v reálných podmínkách . . . . .	16
<b>3 Překážky rozšíření elektromobility</b>	<b>17</b>
3.1 Strach z nedostatečného dojezdu . . . . .	17
3.2 Strach z nedostatku dobíjecí infrastruktury . . . . .	22
3.3 Ekonomická stránka BEV . . . . .	29
3.4 Bezpečnost BEV . . . . .	37
3.5 Ekologická stránka BEV . . . . .	39
3.6 Nedostatek energie a nedostatečná síť . . . . .	47
3.7 Vyhodnocení překážek elektromobility . . . . .	48
<b>4 Současný stav řešení</b>	<b>51</b>
4.1 Stručná historie elektromobility . . . . .	51
4.2 Stav současného poznání . . . . .	56
4.3 Vlastní výzkum . . . . .	62
<b>5 Model dojezdu bateriového elektrického vozidla</b>	<b>70</b>
5.1 Faktory ovlivňující dojezd bateriového elektrického vozidla . . . . .	70

5.2	Možnosti sestavení modelu dojezdu bateriového elektrického vozidla . . . . .	72
5.3	Model BEV pro CMRE . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Návrh algoritmu zpřesňujícího výpočet dojezdu</b>	<b>83</b>
6.1	Přístupy k návrhu výpočtu dojezdu . . . . .	83
6.2	Přístupy k návrhu řízení toku energií . . . . .	84
6.3	Hill Hazard . . . . .	85
6.4	Vlastní algoritmus . . . . .	85
6.5	Možnosti optimalizace . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Realizace původního CMRE algoritmu</b>	<b>89</b>
7.1	Měření pasivní spotřeby . . . . .	89
7.2	Měření přenosu energie „Z akumulátoru na kola“ . . . . .	95
7.3	Získání dat o trase – program Speedgetter . . . . .	97
7.4	Realizace CMRE v programu MATLAB . . . . .	99
7.5	Analýza CMRE algoritmu . . . . .	114
7.6	Optimalizace trasy pomocí výstupů CMRE algoritmu . . . . .	116
<b>8</b>	<b>Ověření funkčnosti CMRE algoritmu</b>	<b>118</b>
8.1	Princip vyhodnocení . . . . .	118
8.2	Diskuze výsledků . . . . .	120
8.3	Analýza měření . . . . .	121
8.4	Srovnání CMRE s vnitřním algoritmem vozidla RR . . . . .	122
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>127</b>
9.1	Budoucí výzkum . . . . .	128
	<b>Literatura</b>	<b>129</b>
	Autorovy publikace k tématu práce . . . . .	146
	Autorovy ostatní publikace . . . . .	146
	Autorovy ostatní výstupy . . . . .	147
	Autorova účast na projektech . . . . .	147
	<b>Přílohy</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>Externí data</b>	<b>149</b>
<b>B</b>	<b>Tabulky</b>	<b>152</b>
<b>C</b>	<b>Obrázky a grafy</b>	<b>161</b>

# Seznam použitých zkratek a symbolů

API	– Application Programming Interface
BEV	– Battery Electric Vehicle <sup>1</sup>
BMS	– Battery Management System
CCS	– Combined Charging System
CHAdemo	– CHArge de MOve
CMRE	– Cyclic Multimodel Range Estimation
EV	– Electric Vehicle <sup>1</sup>
EPA	– Environmental Protection Agency
FCEV	– Fuel Cell Electric Vehicle <sup>1</sup>
GHG	– GreenHouse Gas
HEV	– Hybrid Electric Vehicle <sup>1</sup>
HVAC	– Heating Ventilation Air-Conditioning
ICE	– Internal Combustion Engine <sup>1</sup>
MATLAB	– MATrix LABoratory
MPC	– Model Predictive Control
NEDC	– New European Driving Cycle
NiCd	– Nickel–cadmium battery
NiMH	– Nickel–metal hydride battery
PHEV	– Plug-in Hybrid Electric Vehicle <sup>1</sup>
PTC	– Positive Temperature Coefficient
REX	– Range EXtender
SoC	– State of Charge
SoH	– State of Health
UFC	– Ultra Fast Charging
WLTP	– Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure

---

<sup>1</sup>Graficky názorné dělení elektromobilů je na obrázku C.1 v příloze.

# Seznam obrázků

3.1	Krabicový graf dat průměrných nájezdů vozidel v ČR v letech 2010–2019. . . . .	19
3.2	Srovnání BEV centrem dopravního výzkumu. . . . .	22
3.3	Mapa pokrytí ČR střídavou dobíjecí infrastrukturou. . . . .	25
3.4	Mapa pokrytí ČR střídavou dobíjecí infrastrukturou. . . . .	27
3.5	Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vybraných nových vozů. . . . .	32
3.6	Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vybraných ojetých vozů. . . . .	33
3.7	Současný stav recyklace lithium-iontových článků. . . . .	44
3.8	Průběh celkových emisí z výroby a provozu srovnávaných vozů. . . . .	47
4.1	Leaf: SoC a dojezd v závislosti na čase. . . . .	65
4.2	Leaf: Rychlost a nadmořská výška v závislosti na čase. . . . .	66
4.3	Leaf: Porovnání vypočítaného a naměřeného dojezdu v závislosti na čase. . . . .	66
4.4	iOn: SoC a dojezd v závislosti na čase. . . . .	67
4.5	iOn: Rychlost a nadmořská výška v závislosti na čase. . . . .	68
4.6	iOn: Porovnání vypočítaného a měřeného dojezdu v závislosti na čase. . . . .	68
4.7	Leaf: Variace výpočtu dojezdu na základě změny parametru klouzavého průměru. . . . .	69
5.1	Diagram faktorů ovlivňujících spotřebu BEV. . . . .	71
5.2	Situační schéma působení sil na vozidlo. . . . .	72
5.3	Původní model dojezdu BEV pro CMRE algoritmus. . . . .	76
7.1	Schéma CMRE algoritmu. . . . .	90
7.2	Schéma toků energií a měření spotřeby. . . . .	91
7.3	Schéma nepřímého měření pasivní spotřeby Peugeot iOn. . . . .	92
7.4	Účinnost palubní DC/DC dobíječky Peugeot iOn. . . . .	95
7.5	Schéma měření účinnosti přenosu energie „Z akumulátoru na kola“ Peugeot iOn. . . . .	96
7.6	Graf měření účinnosti přenosu energie „Z akumulátoru na kola“ Peugeot iOn. . . . .	96
7.7	Sekvenční diagram programu <i>Speedgetter</i> k získávání dat o trase. . . . .	98
7.8	Výstup programu <i>Speedgetter</i> . . . . .	99
7.9	Volba modelu BEV pro CMRE a zápis modelu v programu MATLAB. . . . .	100
7.10	Vyskakovací okna CMRE v programu MATLAB. . . . .	101

7.11	Diagnostický výpis z procesu vyhodnocení trasy Ostrava–Přerov CMRE. . . . .	110
7.12	Maximální, průměrná a doporučená rychlost vygenerovaná CMRE algoritmem. . . . .	112
7.13	Mapa trasy Ostrava–Přerov vygenerována CMRE algoritmem. . . . .	113
7.14	Mapa tras Ostrava–Vrchy vygenerovaných algoritmem. . . . .	117
8.1	Srovnání absolutních hodnot odchylek dojezdu CMRE a RR vybraných tras. . . . .	124
8.2	Srovnání relativních hodnot odchylek dojezdu CMRE a RR vybraných tras. . . . .	125
A.1	Množství najetých km flotilových vozů firem v ČR dle ČSU. . . . .	149
A.2	Množství najetých km v ČR dle ministerstva dopravy. . . . .	150
A.3	Počet vozidel v ČR dle ministerstva dopravy. . . . .	151
C.1	Typy elektromobilů. Bloky ohraničené čarkovaně nejsou součástí všech vozidel. . . . .	162
C.2	Záznamy komunity uživatelů vozidel Tesla o SoH jejich trakčních akumulátorů. . . . .	163

# Seznam tabulek

3.1	Tabulka dojezdů BEV prodáváných v roce 2021. . . . .	20
3.2	Tabulka spotřeb BEV prodáváných v roce 2021. . . . .	20
3.3	Srovnání ceny benzínového a elektrického vozidla Hyundai Kona. . . . .	29
3.4	Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vybraných nových vozů. . . . .	31
3.5	Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vybraných ojetých vozů. . . . .	33
3.6	Záruky na trakční akumulátory BEV. . . . .	36
3.7	Podíl prvků a hmotnosti v akumulátorech pro EV. . . . .	41
3.8	Údaje o emisích srovnávaných vozidel. . . . .	46
4.1	Přehled vybraných tras a chyb odhadů dojezdu. . . . .	63
7.1	Zpracovaná data z měření pasivní spotřeby Peugeot iOn – Měření bočnickem. . .	93
7.2	Zpracovaná data z měření pasivní spotřeby Peugeot iOn – Měření z BMS. . . .	94
7.3	Varianty aproximace dat účinnosti „Z akumulátoru na kola“. . . . .	97
7.4	Srovnání tras Ostrava–Vrchy dle optimalizačních kritérií. . . . .	116
8.1	Porovnání výstupu z CMRE algoritmu s naměřenými daty na vybraných trasách.	119
8.2	Porovnání výstupu z CMRE algoritmu s algoritmem výpočtu dojezdu vozidla. .	123
8.3	Statistické srovnání CMRE a RR . . . . .	125
B.1	Surová data z měření pasivní spotřeby BEV – Měření rezistorem. . . . .	152
B.2	Cena za ujetý kilometr vybraných vozů při několika scénářích dobíjení. . . . .	153
B.3	Surová data z měření pasivní spotřeby BEV – Měření z BMS. . . . .	154
B.4	Výsledky měření přenosu energie z akumulátoru na kola. . . . .	155
B.5	Data pro trasu vygenerována programem Speedgetter. . . . .	156
B.6	Tabulka určení pasivní spotřeby pro jednotlivé scénáře. . . . .	157
B.7	Přehled vstupních proměnných původního algoritmu. . . . .	158
B.8	Přehled vnitřních proměnných původního algoritmu. . . . .	159
B.9	Přehled výstupních proměnných původního algoritmu. . . . .	160

# Seznam výpisů zdrojového kódu

7.1	CMRE: Výpočty energie trakčního akumulátoru. . . . .	101
7.2	CMRE: Předzpracování načtených dat trasy. . . . .	103
7.3	CMRE: Výpočet vzdáleností, elevací, úhlů $F_s$ a $F_r$ . . . . .	104
7.4	Funkce <i>lldistkm</i> počítající vzdálenost mezi dvěma body . . . . .	104
7.5	Funkce <i>rhoAirCalculationNew</i> pro výpočet hustoty vzduchu. . . . .	105
7.6	CMRE: Výpočet trasy pro průměrnou rychlost. . . . .	105
7.7	CMRE: Řízení toků energií – omezení . . . . .	107
7.8	CMRE: Řízení toků energií – vyhodnocení . . . . .	108

# Kapitola 1

## Úvod

Ve většině soudobých bateriových elektromobilů může být chyba ukazatele dojezdu až několik desítek procent. Toto společně s obecně nižším dojezdem bateriových elektrických vozidel (BEV), přispívá k nedůvěře a neúměrným požadavkům na dojezd v relaci k reálným potřebám uživatelů. Přesné algoritmy pro určování dojezdu a řízení energií v elektromobilech jsou nejslibnějšími nástroji, které mohou pomoci zpřesnit hodnotu dojezdu, zvýšit jeho důvěryhodnost, a díky tomu odstranit zásadní překážku rozšíření elektromobility – strach z nedostatečného dojezdu. To by se mohlo odrazit v širším uplatnění menších, ekologičtějších a levnějších BEV.

Hlavními výzvami v řešení problému přesného a robustního algoritmu jsou zejména identifikace modelu soustavy BEV, zakomponování aktuálního stavu vozidla do tohoto modelu, zpracování mapových podkladů a navigace a v neposlední řadě napojení modelu na aktuální stav počasí a dopravního provozu.

Pokročilé algoritmy založené na tomto modelu mohou být cenným pomocníkem pro běžné uživatele, kterým poskytnou bázi znalostí zkušených řidičů BEV. Pomohou díky znalosti mapových podkladů přesně vypočítat, o kolik náročnější může být trasa kopcovitým terénem z hlediska spotřeby energie. Pomocí informací o počasí spočítají, jak ovlivní spotřebu elektromobilu déšť, protivítr nebo námraza. Díky datům z diagnostiky vozidla pomohou s odhadem zvýšení spotřeby vlivem vyššího zatížení, podhuštění pneumatik nebo promrznutí akumulátoru. Tyto algoritmy díky těmto cenným informacím dovedou také hospodárně nakládat s energií a s expertními znalostmi o elektromobilu, které nemá běžný řidič, umožňují jezdit efektivněji. Například drobné omezení maximální akcelerace není pro řidiče limitující, ale dovede prodloužit dojezd. Omezení dálniční rychlosti prodlouží dobu cestování o několik procent, ale díky ušetřené energii lze snížit počet dobíjecích zastávek a tím naopak čas ušetřit.

V době zpracování této práce je na trhu pouze několik modelů elektrických vozidel se zabudovanou navigací využívající mapové podklady, dopravní informace a počasí. Žádné z těchto vozidel nenabízí omezení toku energií, optimalizaci trasy dle nejkratšího času nebo volbu trasy



s nejmenší spotřebou. Právě tyto vlastnosti, spolu se zpracováním algoritmů mimo uzavřená vývojová střediska automobilového průmyslu, jsou zásadním přínosem této práce.

Práce zahrnuje motivaci pro elektromobilitu, technologickou historii elektromobility, rešerši současného stavu výpočtu dojezdu v bateriových elektromobilech, identifikaci modelu, výsledný návrh vlastního algoritmu CMRE a následně vyhodnocení algoritmu v reálném provozu.

## Kapitola 2

# Cíle doktorské práce

Kapitola popisuje předchozí výzkum a zkušenosti, které odhalily výzvy a problémy, jež budou v této práci řešeny. Na jejich základě byly rovněž stanoveny cíle disertační práce, které budou představeny v následujících podkapitolách.

### 2.1 Pozadí výzkumu

Autor práce se již devátým rokem zabývá elektromobilitou. První praktické zkušenosti byly získány při stavbě dobíjecí stanice a vývoji vozidel Kaipan. Pro diplomovou práci byl zvolen vývoj elektrokoloběžky (Dedek, 2016) a vývoj balancerů pro baterý management systém (BMS) navrženého trakčního akumulátoru ve spolupráci s kolegou (Golembiovský, 2016). Výzkum těchto možností malé elektromobility dále pokračoval i v průběhu doktorského studia a byl podkladem několika autorových publikací (Zdenek Slanina; Dedek et al., 2016)(Z. Slanina et al., 2017)(Golembiovsky; Dedek; Zdenek Slanina, 2017). V rámci doktorského studia byl rovněž aplikován výzkum na platformě elektrické čtyřkolky Selvo a v rámci tohoto výzkumu byl uvedený bateriový elektromobil napojen na dálkové ovládání a připraven pro plně autonomní provoz (Dedek; Koziorek et al., 2017). Díky BEV v inventáři katedry začal rovněž výzkum elektromobility osobních vozů. Dvě autorovy publikace (Dedek; Docekal et al., 2019)(Dedek; Zidek, 2019) se zabývaly identifikací algoritmů pro výpočet dojezdu, nicméně dosáhly pouze dílčích úspěchů. Disertační práce byla zčásti realizována na půlroční pracovní stáži na Tampere University of Technology ve Výzkumném Centru Dopravy Verne. Plánovaná půlroční stáž byla přerušena pandemií COVID-19. Posledním publikovaným výzkumem bylo měření pasivní spotřeby elektromobilu (Dedek; Zidek, 2020), jednou z důležitých součástí modelu BEV.

Při zpracovávání publikovaného výzkumu z navazujících projektů a z dlouhodobé spolupráce na propagaci bateriové elektromobility vyvstaly následující cíle disertační práce:

## 2.2 Sociologické a technické překážky bránící rozšíření BEV

Nejdůležitějším cílem této práce je pomoci s rozšířením bateriové elektromobility bez ekologických a ekonomických negativ a bez současného snížení pohodlí cestování. Ačkoliv tyto cíle při specifickém využívání elektromobility plní již od 19. století (viz 4.1), společnost dosud není ochotna přijmout elektromobily jako alternativu k běžným spalovacím motorům (ICE – z ang. Internal Combustion Engine). Nejčastější důvody pro odmítání širší adaptace BEV (seřazeno podle důležitosti):

1. Malý dojezd na jedno nabití<sup>1</sup>.
2. Nedostatek dobíjecí<sup>1</sup> infrastruktury.
3. Ekonomická hlediska – pořizovací cena a cena provozu.
4. Nebezpečí plynoucí z provozu elektromobilu.
5. Sporné ekologické benefity.
6. Vysoká spotřeba energie ohrožující stabilitu energetické sítě.

Z jejich analýzy vyvstaly cíle disertační práce. Důležitým hlediskem je pochopení psychologických bariér řidičů, jejich obav dojíždět do cíle bez rezervy a zvyklostí při tankování či dobíjení. Pro širokou adaptaci algoritmu a z toho vyplývající zmírnění strachu z dojezdu BEV, musí být tyto preference a limity pochopeny a implementovány do navrženého algoritmu.

## 2.3 Rešerše historie BEV, historický dojezd a způsob jeho výpočtu

Historie elektromobility sahá již do poloviny 19. století, kdy se v Rakousko-Uhersku rodily první pokusy o elektrifikované vozidlo. Následujících 60 let spolu sváděly rovný boj spalovací a elektrický pohon a zcela tak vytlačily parní stroj ze silnic.

Tento cíl disertační práce směřuje k nalezení a vysvětlení důvodu úpadku elektromobility na počátku 20. století a také k popsání důvodů návratu elektrických pohonů na silnice na přelomu milénia. Dalším cílem je rešerše vědeckého poznání v oblasti výpočtu dojezdu, identifikace a modelování BEV.

---

<sup>1</sup>Dle vyjádření Ústavu pro Jazyk Český, které si nechal autor práce vypracovat cituji: *Nahlédli jsme i do Technického naučného slovníku (2001), v němž je uvedeno: dobíjení je „druhotná dodávka do akumulátoru“.* Heslo nabíjení je sice též v tomto slovníku uvedeno, ale jen v souvislosti se zbraněmi a v závěru je připojen, pokud jde o význam tohoto výrazu v elektrotechnice, na heslo akumulátor. V tomto hesle se píše jen o tom, jak proces nabíjení probíhá, ale výraz nabíjení tam definován není. Proto autor práce používá pro slova spojená s procesem dodávání energie předponu do jako například: *dobíjecí stanice; dobítí elektromobilu; aj,* ale pro stav akumulátoru je používána předpona *na* příkladem *úroveň nabití; nabíjecí cyklus; aj.*

## 2.4 Identifikace BEV a určení faktorů ovlivňujících dojezd

Z provedené rešerše byly některé parametry ovlivňující dojezd zřejmé a jiné vyžadovaly praktické měření – zejména způsob výpočtu dojezdu dostupných BEV. Praktická měření a zkušenosti prokázaly značnou nepřesnost a nízkou robustnost užívaných algoritmů.

Vzhledem k nedostatku veřejně přístupných informací, vyplývajících z uzavřené povahy výzkumu automobilových společností, byla provedena analýza mající za cíl identifikovat způsob výpočtu dojezdu ve dvou nejrozšířenějších BEV.

Jelikož měl tento výzkum pouze částečný úspěch, bylo nutno přistoupit k vlastnímu modelování BEV. K identifikaci většina prostudovaných vědeckých zdrojů použila matematický model. Ten v reálných podmínkách vykazuje nízkou přesnost a robustnost, nebo je, při vysoké přesnosti, poměrně složitý, a tedy nepoužitelný pro výpočty v reálném čase s minimálním výpočetním vybavením. Tento cíl práce přispívá k nástinu způsobu modelování, který spojuje namodelování základních sil působících na vozidlo a identifikace dílčích částí systému, které vykazují minimální závislost na více parametrech. Takovýto přístup poskytne relativně přesný model jako základ pro návrh pokročilých algoritmů výpočtu dojezdu BEV.

## 2.5 Vývoj algoritmu výpočtu dojezdu BEV s řízením toků energií

V této části práce jsou nastíněny problémy při tvorbě algoritmů jako hill hazard, extrémní závislost dojezdu na terénu a rychlosti, ale také drobné, nicméně znatelné problémy s variabilitou konstant. V další fázi byl vytvořen původní CMRE algoritmus kombinací sekvenční rozhodovací logiky a adaptací na podmínky pomocí regulátorů. Tyto adaptace vedou k možným úsporám energie na trase a mohou tak poskytovat doporučení řidiči, zavádět omezení akčních veličin v autonomních vozidlech nebo jejich data mohou být vstupem optimalizačních procesů.

## 2.6 Ověření přesnosti algoritmu v reálných podmínkách

Nezbytným cílem dizertační práce je experimentální ověření funkcionality navržených algoritmů v provozu. Algoritmy z dostupných vědeckých zdrojů dosahují 98% přesnosti. Tato práce si klade za cíl dosáhnout podobných výsledků. Taková spolehlivost by společně s nastavitelnou rezervou pro psychické pohodlí řidiče a se schopností ušetřit energii měla postačit ke zmírnění strachu z omezeného dojezdu BEV u široké veřejnosti. To by přispělo k širší adaptaci BEV a k plnému využití potenciálu, který tato technologie nabízí. Rovněž by taková přesnost umožnila navázat ve výzkumu a řešit širokou škálu aplikací od carsharingu, přes inteligentní dobíjení, vyhlazování špiček v síti, až po poloostrovní systémy.

## Kapitola 3

# Překážky rozšíření elektromobility

O elektromobilitě se šíří mnoho diskreditujících informací. Pokud by byly pravdivé, dalo by se konstatovat, že elektromobilita nemůže být způsobem, který nahradí současné neekologické pohony vozidel. Tím by tato práce postrádala smysl. Rovněž je nutno pro potřeby dalšího vývoje této práce pochopit, jak lidé svá vozidla používají, čeho se obávají, a tedy jak navrhnout algoritmy v elektromobilech pro zmírnění těchto obav. Zkušenosti pro tuto kapitolu byly čerpány jak z vědeckých publikací, tak z osobních zkušeností při prezentování elektromobility.

Kromě technických parametrů a technologických omezení je hlavním problémem strach uživatelů. Kromě níže diskutovaného strachu z nedostatečného dojezdu (z ang.: Range anxiety) popsal autor ve svém článku (Carleton, 2016) strach z neznáma. Tato fobie, která u mnohých lidí přerůstá až v agresi, má významnou roli v akceptaci nových technologií. I přes to, že nás elektromobilita provází nepřetržitě již 150 let (viz kapitola 4.1), v minulém století upadala do zapomnění, a proto ji většina lidí považuje za novinku. Právě díky této fobii je pro akceptaci elektromobility podstatné jak vylepšování technologických parametrů, tak odstranění neopodstatněných fobií z dojezdu a z nové technologie.

### 3.1 Strach z nedostatečného dojezdu

Nejčastější stížnosti ze strany veřejnosti jsou právě na neschopnost elektromobilů zvládat delší cesty bez časových ztrát u dobíjecích stanic. Uživatelé spalovacích a vznětových motorů (ICE) si zvykli, že dojezd jejich vozidla je od 500 do cca 1 200 km na jednu plnou nádrž. Rekordní dojezd komerčního elektromobilu na jedno nabití je sice 1 078 km (Kane, 2017), ale při běžném používání je zpravidla poloviční. Levnější vozidla mají menší akumulátor a tedy i menší dojezd. Kromě ceny roste s kapacitou trakčního akumulátoru i ekologická zátěž při výrobě. S rostoucí kapacitou roste i hmotnost vozidla spolu se spotřebou. Potenciální uživatelé musí při nákupu BEV zvažovat více parametrů, mezi nimi zejména potřebný dojezd. Díky zvyklostem z ICE vozidel je na poloviční dojezd BEV pohlíženo kriticky.

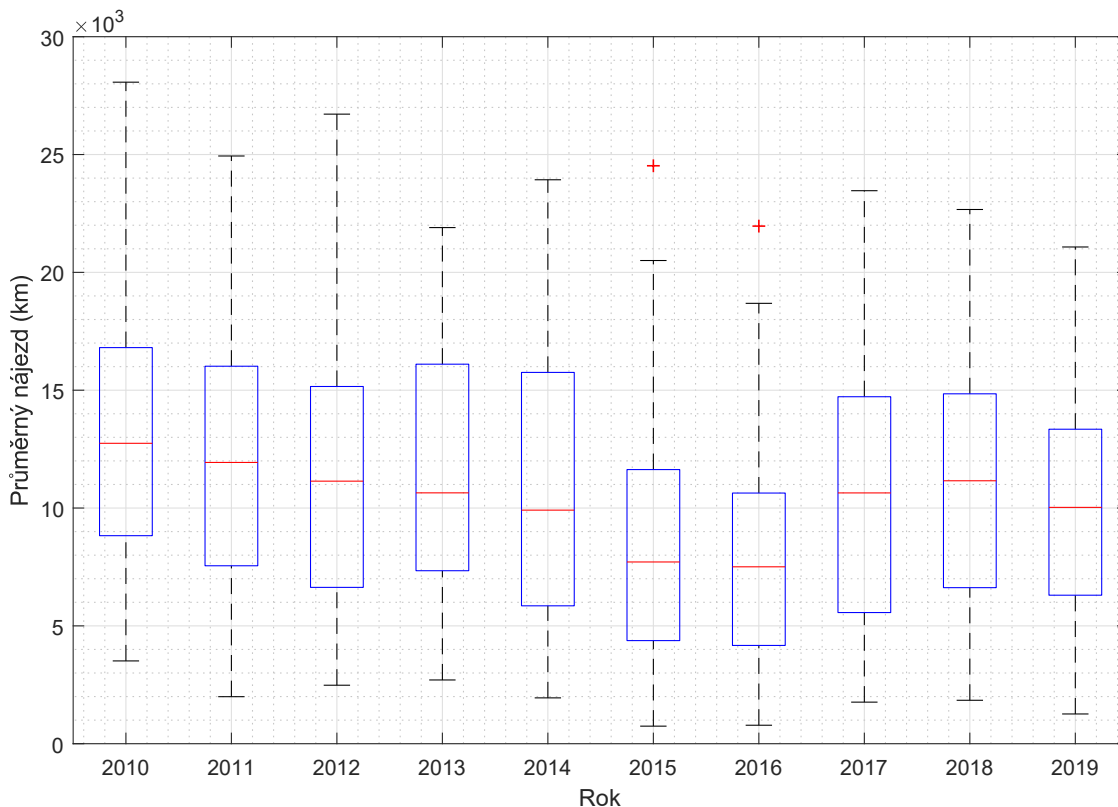
### 3.1.1 Reálné potřeby řidičů

Potřebami dojezdu řidičů osobních automobilů se v průběhu posledních desetiletí zabývalo mnoho autorů, například (Franke; Neumann et al., 2011)(Pearre et al., 2011). Statisticky nejlépe je řešerše zpracována v článku (Franke; Krems, 2013). Ten nabízí informace z 8 zdrojů o potřebách dojezdu mezi řidiči, převážně německých, ale i evropských a amerických výzkumů. Jeden výzkum tvrdí, že průměrný německý řidič ujede 39 km denně. Podle jiné studie je průměrný nájezd v Německu 41 km denně. Další studie se zabývala percentily a zjistila, že 80 % řidičů najede méně než 50 km, 95 % řidičů najede méně než 100 km a průměrně 12 jízd za rok překročí hodnotu 160 km. V 8 zemích EU (UK, FR, DE, IT, NL, SE, ES, PT) 61 % řidičů najede denně do 100 km a pouze 15 % řidičů najede více než 150 km denně. Naopak v USA by dojezd 96 km (60 mil) uspokojil potřeby 83 % řidičů, 129 km (80 mil) 90 % řidičů a 193 km (120 mil) 95 % řidičů.

Bohužel pro Českou republiku nebyl dle dostupných informací proveden podobný výzkum. Dotaz adresovaný Českému statistickému úřadu na takováto data byl zodpovězen pouze částečnou statistikou vozidel flotil velkých firem (nad 50 vozidel). Tato vozidla najela průměrně 24 531 km ročně, což odpovídá 67 km denně. Odpověď, včetně dat je v příloze A.1. Pokud bychom brali v úvahu pouze pracovní dny (v průměru 251 ročně) vychází nájezd na 98 km za pracovní den. Tyto výsledky jsou značně zkresleny vlivem neschopnosti rozlišit kilometry pracovních cest a najeté kilometry vozidel, které zaměstnanci používají jako zaměstnanecký benefit k soukromým účelům sedm dní v týdnu.

Další pátrání po relevantních datech vedlo na ministerstvo dopravy, které zaslalo balík dat ze stanic technických kontrol. Na těchto stanicích se v rámci každé technické prohlídky silničních vozidel zaznamenávají data o celkovém nájezdu vozidla. Na obrázku 3.1 je krabicový diagram vývoje nájezdu v letech 2010–2019. Data jsou v příloze A.2.

Dle těchto dat je průměrný nájezd vozidla 10 604 km ročně s klesající tendencí. V přepočtu jde o přibližně 29 km denně. V těchto statistikách je s vysokou pravděpodobností zanesena chyba, způsobená nepoužívanými a veteránskými vozidly nebo vozy s upraveným ukazatelem celkového nájezdu. Celková výpovědní hodnota je navíc zkreslená faktem, že jde o vyhodnocení již zpracovaných průměrných nájezdů. Z těchto důvodů lze hodnotu 10 604 km označit spíše za kvalifikovaný odhad. Vzhledem k charakteristickému reliéfu krajiny v České republice je oproti Německu 25% pokles nájezdu, s denním průměrem 40 km, pochopitelný.



Obrázek 3.1: Krabicový graf dat průměrných nájezdů vozidel v ČR v letech 2010–2019.

### 3.1.2 Dojezd současných bateriových elektromobilů

BEV s nejmenší kapacitou akumulátoru a tedy i s nejmenším dojezdem, prodávané v roce 2021, je Smart EQ fortwo s WLTP<sup>1</sup> dojezdem 133 km a reálným dojezdem mezi 70 a 160 km (EV-databaze, 2021e). Jedním z nejlépe hodnocených BEV v roce 2020 je Škoda CitigoE s WLTP dojezdem 257 km a reálným dojezdem mezi 145 a 320 km (EV-databaze, 2021d). Tento model společně se sesterským Seat Mii, který je stále v prodeji, byl rovněž cenově nejdostupnější (EV-databaze, 2021c). Obě vozidla mají 36,7kWh trakční akumulátor. Tato vozidla tedy stačí průměrnému Čechovi k 7 dennímu městskému provozu v zimním období a 11 dennímu městskému provozu v letním období bez nutnosti dobíjení akumulátoru. V segmentu středních vozidel v roce 2020 vynikala zejména nová generace Renaultu Zoe (EV-databaze, 2021a). Jeho 55kWh akumulátor stačí na ujetí až 395 km dle metriky WLTP a reálný dojezd se pohybuje mezi 220 a 475 km. Průměrnému českému řidiči toto vozidlo vystačí pro pokrytí 7–16 dní cestování dle teploty a volených tras.

<sup>1</sup>WLTP (WLTP, 2017) tedy Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure je jednou z testovacích procedur pro osobní vozidla. Jejím úkolem je objektivně posoudit spotřebu, emise a dojezd nejen elektromobilů. Má být používána celosvětově a v Evropě nahradila neadekvátní NEDC (NEDC, 2013), zatímco v USA se stále používá více vypovídající EPA (EPA, 2005-09-07). Obecně platí: NEDC > WLTP > EPA > Reálný dojezd.

V roce 2020 měl být uveden do prodeje Tesla Roadster 2. generace s dojezdem cca 1 000 km. Místo toho se díky pokrokům firmy Tesla ve vývoji elektrochemických článků pro trakční akumulátory objevila nová verze Tesly model S s názvem Plaid (EV-databaze, 2021f). Současné vozy Tesla mají reálný dojezd až 650 km a nová verze slibuje 840 km dle WLTP metriky. Reálně lze odhadovat dojezd 480–970 km na jedno nabití. Tento vůz vyšší třídy průměrnému českému řidiči poskytne bezstarostné ježdění 16–33 dní. Což znamená, že v letním období by bylo potřeba dobít akumulátor, v ideálním případě, jednou měsíčně. V tabulce 3.1 jsou vozidla prodávána v roce 2021 seřazena dle nejvyššího průměrného dojezdu.

Tabulka 3.1: Tabulka dojezdů BEV prodáváných v roce 2021. Seřazeno sestupně. Data převzata z (EV-databaze, 2021b).

Dojezd (km)	Dojezd v létě			Dojezd v zimě		
	Město	Kombinovaný	Dálnice	Město	Kombinovaný	Dálnice
Vozidlo						
Tesla model S LR	790	640	525	520	460	400
Tesla model 3 LR	670	535	440	435	385	330
Porsche Taycan Plus	645	525	430	435	385	335
Audi e-tron gT quattro	600	480	395	410	360	310
Hyundai Kona El. 64 kWh	595	460	365	390	335	280
Mercedes EQC 400 4MATIC	530	420	340	370	315	270
Jaguar I-Pace EV400	530	410	330	375	315	260
Nissan Leaf e+	485	375	300	320	275	230
Renault Zoe ZE50 R110	475	365	285	310	265	220
BMW i3	360	275	210	235	200	165
Hyundai Ionic Electric	285	220	180	180	160	135
Mini Cooper SE	280	210	170	180	155	130
Honda e	255	195	155	165	140	120

Nejefektivnější BEV jsou seřazena dle průměrné spotřeby v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Tabulka spotřeb BEV prodáváných v roce 2021. Seřazeno vzestupně. Data převzata z (EV-databaze, 2021b).

Spotřeba (kWh/100 km)	Spotřeba v létě			Spotřeba v zimě		
	Město	Kombinovaná	Dálnice	Město	Kombinovaná	Dálnice
Vozidlo						
Hyundai Ionic	9,8	12,7	15,6	15,6	17,5	20,7
Tesla model 3 LR	10,4	13,1	15,9	16,1	18,2	21,2
Mini Cooper SE	10,3	13,4	17,0	16,1	18,6	22,2
BMW i3	10,5	13,8	17,6	16,1	19,0	23,0
Hyundai Kona El. 64 kWh	10,8	13,9	17,5	16,4	19,1	22,9
Tesla model S LR	11,4	14,1	17,1	17,3	19,6	22,5
Renault Zoe ZE50 R110	10,9	14,2	18,2	16,8	19,6	23,6
Honda e	11,2	14,6	18,4	17,3	20,4	23,8
Nissan Leaf e+	11,5	14,9	18,7	17,5	20,4	24,3
Porsche Taycan Plus	13,0	15,9	19,5	19,2	21,7	25,0
Audi e-tron gT quattro	14,2	17,7	21,5	20,7	23,6	27,6
Mercedes EQC 400 4MATIC	15,1	19,0	23,5	21,6	25,4	29,6
Jaguar I-Pace EV400	16,0	20,7	25,7	22,6	26,9	32,6



Z výše získaných dat a rešerše aktuálně prodávaných elektromobilů lze vyvodit, že soudobé elektromobily urazí na jedno nabití 80 až 970 km v běžném městském a meziměstském provozu, případně 60–480 km v podmínkách chladného počasí dálniční rychlostí. Maximální vzdálenost vzhledem k nastaveným rychlostním limitům ve většině Evropy nelze překonat rychleji než za 4 hodiny. Vzhledem k průměrným rychlostem na dálnicích (dle dat z openstreetmap 100–110 km/h) je tento dojezd vyšší a zároveň doba významně delší, než je povinná bezpečnostní přestávka dle Nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č. 561/2006 čl. 7. Ta musí trvat 45 minut. Během této doby je u většiny BEV možno dobít akumulátor do cca 80 % a vozidlo je tak připraveno k další cestě.

Již v kapitole 1 byl nastíněn problém s přesností údaje dojezdu zobrazovaného palubním počítačem BEV. Ten může v extrémních situacích dosahovat až 70 % chyby, jak bylo uvedeno například v (Wager et al., 2016). Cílem této práce je tuto chybu minimalizovat, což bude obsahem dalších kapitol.

### 3.1.3 Budoucnost vývoje dojezdu

V roce 2011 bylo v České republice možno koupit jen několik typů elektromobilů. Mezi nimi byla takzvaná trojčata, tedy Peugeot iOn, Mitsubishi I-MiEV a Citroën C-Zero. Právě Citroën se v dubnu 2011 dal koupit za bezmála 900 000 Kč. Ve výbavě měl 16kWh akumulátor a dojezd podle WLTP cca 100 km. Parametrově nejlepším elektrickým autem byl Tesla Roadster s 53kWh akumulátorem a dojezdem 393 km (dle metriky EPA) za cenu při současném kurzu dolaru 2 334 000 Kč. O 10 let později je nástupcem Citroënu model e-C4 s dojezdem dle WLTP 350 km a 50kWh akumulátorem se základní cenou pod 800 000 Kč. Srovnání dvou generací vozů Citroën je na obrázku 3.2. Tesla long range model S s nejvyšším dojezdem se začne dodávat v dubnu 2021. Její akumulátor má 90 kWh a vozidlo bude dle WLTP schopno ujet 663 km. Základní cena je 1 700 000 Kč. V tomto roce bude Tesla rovněž vyrábět model S plaid + s 120kWh akumulátorem a deklarovaným dojezdem přes 840 km cena tohoto vozu je v přepočtu bezmála 3 000 000 Kč pro americký trh.

Během jednoho desetiletí se tedy dojezd u nejmenších modelů zvýšil více než čtyři krát, při současném poklesu ceny. Tesla, lídr celého BEV odvětví, zvládla zdvojnásobit dojezd, a to při změně tvaru auta ze sportovního na rodinný sedan. Rovněž dokázala při zachování dojezdu Roadsteru snížit cenu na polovinu, a to u svého modelu 3. Vzhledem k tomu, že objektivně většina uživatelů nevyužije takto vysoký dojezd, budou pravděpodobně světoví výrobci cílit spíše na snížení ceny a zvýšení efektivity. Například Škoda CitigoE s 36,8kWh akumulátorem a dojezdem WLTP 257 km byla za cenu začínající na 400 000 Kč první praktickou ukázkou nového trendu.



Obrázek 3.2: Srovnání BEV centrem dopravního výzkumu. Převzato z (CDV, 2021).

## 3.2 Strach z nedostatku dobíjecí infrastruktury

Prodej elektromobilů v posledních letech roste. Zatímco v roce 2015 byly celosvětové prodeje automobilů do zásuvky (tedy BEV a PHEV) přibližně v počtu 500 000 vozidel, v roce 2020 i přes probíhající pandemii a ekonomické dopady krize bylo prodáno 3,24 milionu BEV/PHEV. Celkový podíl prodeje aut do zásuvky vzrostl z 0,6 na 4,2 % (EVVolumes, 2020). Například v Norsku v roce 2020 činil prodej BEV/PHEV více než polovinu celkových prodejů nových vozidel (Reuters, 2021-01-05). V České republice je situace jiná. Dle dat ze Sdružení dovozců automobilů (SDA) činily prodeje osobních automobilů do zásuvky za stejné období celkem 4 845 z celkového počtu 202 972 prodaných vozidel, což jsou necelá 2,39 %.

S nárůstem nových prodejů je žádoucí budování hustší sítě dobíjecí infrastruktury pro dálkové cestování, ale rovněž zajištění možnosti dobíjení pro řidiče, kteří nebydlí v rodinném domě. Zejména dobíjení přes noc je stěžejním pilířem používání BEV. Takzvané „Pomalé dobíjení“ střídavým proudem přináší mnoho benefitů. Elektromobily při dobíjení z domácí zásuvky mohou každé ráno vyjet s „plnou nádrží“. Tento způsob doplňování energie přináší rovněž technické a ekonomické benefity.

### 3.2.1 Dobíjení střídavým proudem a palubní dobíječkou

Dle výzkumu (Hardman et al., 2018) 83,7 % veškerého dobíjení probíhá v domácích podmínkách. Autor (Neubauer; Wood, 2014) tvrdí, že 86–90 % uživatelů uspokojí 1,5 kW dobíječka

doma, a že více než posilování těchto kapacit by bylo dobré tyto kapacity zpřístupnit například v práci, či přidat do veřejného prostoru 6,5 kW dobíjecí body či stejnosměrné rychlodobíjecí stanice.

Vědecké výzkumy a články se neshodnou na hlavní příčině degradace trakčních akumulátorů. Například (De Vroey et al., 2015) sbíral tři roky data pěti stejných BEV s různými vzorci dobíjení a degradace zkoumaných akumulátorů byla podobná. Komunita má za to, že časté dobíjení extrémními výkony (například dobíjení 75 kWh akumulátoru Tesla model 3 výkonem 250 kW, což je  $3,3 C^2$ ) vede k rychlejší degradaci akumulátoru. Názory odborníků rovněž tvrdí, že příliš dlouhé dobíjení, a zejména balancování článků na maximálním technologickém napětí, může způsobovat vyšší degradaci než rychlodobíjení. Z těchto poznatků vyplývá, že optimum je dobíjení nižšími proudy (0,25–0,33 C) do 80 % SoC. Většina vyráběných elektromobilů dokáže omezit proud palubní dobíječky a zároveň nastavit úroveň nabití akumulátoru, při kterém se má dobíjení akumulátoru ukončit. Tímto nastavením jde prodloužit životnost trakčního akumulátoru a také snížit zátěž elektrické sítě.

Starší elektromobily měly často palubní dobíječku konstruovanou na jednofázové dobíjení maximálně 16 A. Tato vozidla tedy nevyžadovala žádné přídatné jištění a díky programovatelnému proudu 6–16 A dokázala využít jakoukoliv 230V zásuvku. Maximální výkon palubní dobíječky byl cca 3680 W, přičemž většina BEV nevyužije maximální proud kvůli rezervě a kompenzaci. Ve většině případů se takto velkým odběrem sníží napětí okruhu, a pokud chce dobíječka udržet konstantní výkon, musí při poklesu napětí zvýšit odběr proudu.

Limitace těchto dobíječek jsou zřejmé. Například ve vozidlech Peugeot iOn / Mitsubishi i-MiEV / Citroën C-Zero dovedl trakční akumulátor uchovat energii až 16 kWh (některé modely po roce 2013 pouze cca 14,5 kWh), takže palubní dobíječka zvládla tento vůz dobít z 0 % na 100 % SoC za 5–6 hodin. To koresponduje s pracovní dobou nebo dobou spánku. Stejně tak Nissan Leaf s 24 později 30 kWh akumulátorem nebo VW e-Golf s 24 kWh akumulátorem se byl schopen dobít výkonem běžné zásuvky za noc. S narůstající kapacitou, a tím uloženou energií v trakčních akumulátorech, tedy zákonitě stoupal výkon palubních dobíječek. Už výše jmenovaný Nissan Leaf přišel s výkonější palubní dobíječkou jako příplatkovou výbavou. 6,6 kW vyžadovala jištění 32 A, což by pro standardní rodinné domy vyžadovalo nesmyslné navýšení poplatků za rezervovaný výkon. Na veřejných střídavých dobíjecích stanicích byl zpravidla schopen dobíjet vyšším výkonem a tím zkrátit celkový čas dobíjení na přibližně 4 hodiny.

Jiní výrobci BEV přišli s odlišným způsobem navyšování výkonů, a to implementací vícefázových dobíječek. Tesla v Evropě standardně dodávala své vozy s 11 kW palubní dobíječkou a již v roce 2012 (Tesla, 2009) přidala možnost vysokoproudých dobíječek (pojmenování vzniklo díky nižšímu napětí v americké síti a tím pádem vysokým proudům pro stejný výkon) nejprve pro  $3 \times 24$  A, což je 16,5 kW. Nejběžnější variantou pro Evropu je dvojitá dobíječka s vý-

---

<sup>2</sup>Znakem C je myšlen násobek kapacity. U článku s kapacitou 100 Ah je proud 0,25 C roven 25 A.

konem 22 kW. Tyto konfigurace se používají dodnes. I vozy s nejvyšší kapacitou trakčního akumulátoru lze dobít 11 kW za 9 hodin, v případě silnější 22kW dobíječky za 5 hodin.

Jinou strategií zvolil výrobce Renault u svého vozidla Zoe. Ten měl akumulátor s maximálním množstvím uložené energie 26 kWh, základní palubní dobíjení měl 22 kW a příplatková výbava v některých verzích byla až 43 kW, což znamenalo  $3 \times 63$  A. U dobíjecích stanic a průmyslových přípojek se tento výkon dá využít a tím dobít trakční akumulátor Zoe za přibližně půl hodiny do 80 %. V základní výbavě se dobíjelo vozidlo déle než hodinu. Toto vozidlo však nemělo možnost stejnosměrného dobíjení. Tento přístup silných palubních dobíječek Renaultu vydržel dodnes. Jeho 55 kWh verze Zoe má stále výhodu palubní dobíječky o výkonu 22 kW a schopnosti dobít vozidlo do plného stavu za 3 hodiny.

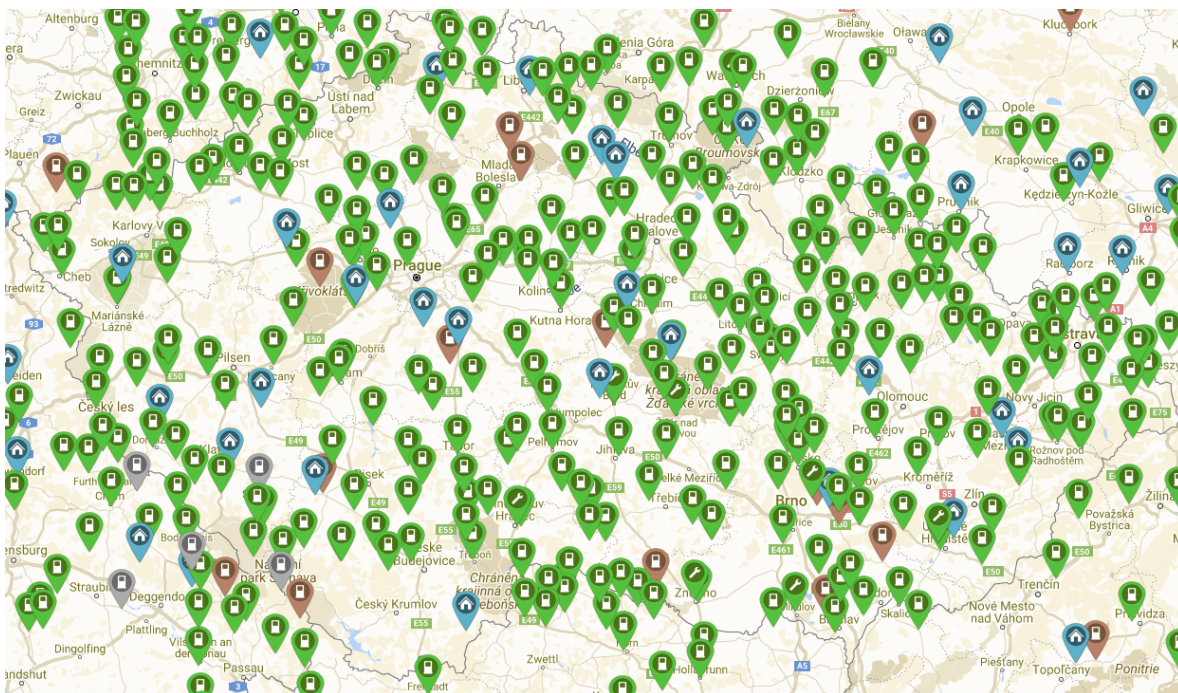
V teoreticky dokonalém případě tedy lze každé EV z adekvátní zásuvky dobít za noc. Nespornou výhodou je, že běžné 230V nebo průmyslové zásuvky se nacházejí v každém obchodním centru, podzemní garáži, v každém domě. A dobít tedy lze při každé návštěvě ve většině obchodních center, i když v něm není dedikovaná dobíjecí stanice pro elektromobily. Jsou případy, kdy dovolená na horské chatě na konci elektrické sítě neposkytuje 11kW průmyslovou zásuvku CEE, ale pouze 230V zásuvku, která je jistěna stejným jističem, který jistí celý objekt.

Nyní budou uvedeny dva příklady dobíjení v extrémně nepříznivých podmínkách:

**Peugeot iOn:** Palubní dobíječka tohoto vozu při proudu 6 A a při poklesu napětí napájecí sítě na 220 V dodává výkon cca 1 320 W, při započtení nízké účinnosti palubní dobíječky cca 75 % bude do akumulátoru uložena přibližně 1 kWh každou hodinu. To při spotřebě 12,5 kWh/100km stačí pro ujetí přibližně 8 km. Za 16 hodin se vozidlo s novým akumulátorem bez degradace dobije úplně.

**Tesla 100 kWh:** Při stejných podmínkách sítě a znatelně lepší účinností palubní dobíječky cca 94 % bude do akumulátoru dodáno cca 1 240 Wh každou hodinu. Plné nabití akumulátoru při počátečním úplném vybití a dobíjení do 100 % SoC tedy bude dosažitelné až za 80 hodin. Každou hodinu Tesla model S long range dobije energii potřebnou k překonání 7,5 km za průměrné spotřeby. Za noc (10 hodin) tedy 75 km a za víkend na chatě (40 hodin) celých 300 km.

Tedy i v těch nejhorsších podmínkách lze za dvě noci na horské chatě dobít energii na dalších 150 km v jednom z největších elektrických vozidel na trhu. I poloviční hodnota dojezdu stačí v České republice k dojetí na nejbližší rychlodobíjecí stanici. V České republice je dle serveru nabijto.cz 553 střídavých dobíjecích stanic a dalších 199 zásuvek k dobíjení elektromobilů (stav ke 4. 2. 2021). Mapa pokrytí těmito dobíjecími body je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Mapa pokrytí ČR střídavou dobíjecí infrastrukturou dle serveru nabijto.cz ke 4. 2. 2021.

### 3.2.2 Stejnoseměrné dobíjení rychlodobíjecí stanic

Na dlouhých cestách tankování pohonnými hmotami zabere několik minut. Cílem výrobců elektromobilů je tuto možnost poskytnout i při dobíjení BEV. Zatímco ve spalovacích a vznětových motorech lze čerpat palivo do nádrže rychlostí nejčastěji 40l za minutu, a tak i tankování největších nádrží osobních vozidel nezabere více než několik minut, proud do akumulátoru BEV je limitován jeho velikostí, technologií, stavem a teplotou. Na rozdíl od střídavého dobíjení, kde je limitujícím faktorem palubní dobíječka, stejnosměrné dobíjení dodává energii přímo do trakčního akumulátoru. Ačkoliv možnost stejnosměrného dobíjení neměla v historii všechna BEV, v moderních vozidlech je vždy, až na několik městských modelů. Výsledná rychlost dobíjení je dána použitým konektorem, tedy limitací díky jeho technickému provedení, výkonem rychlodobíjecí stanice a nastavením BMS akumulátoru ve vozidle.

V Evropě se používají tři typy konektorů, CHAdeMO, CCS2 a Tesla supercharger (upraveny Type2 IEC 62196). CHAdeMO má technologickou limitaci na 62,5 kW tedy 125 A při 500 V v první verzi, případně pak 400 kW tedy 1 000 A při 400 V ve druhé verzi. CCS2 byl původně navržen pro 100 kW výkonu, maximálně 125 A a 850 V. Na konci roku 2020 bylo po celé Evropě 325 dobíjecích stanic IONITY s výkonem 350 kW, maximálně 500 A a 920 V, používajících CCS2 konektor. Upravený Type2 konektor, který využívají vozidla Tesla, je schopen dobíjet výkonem až 250 kW.

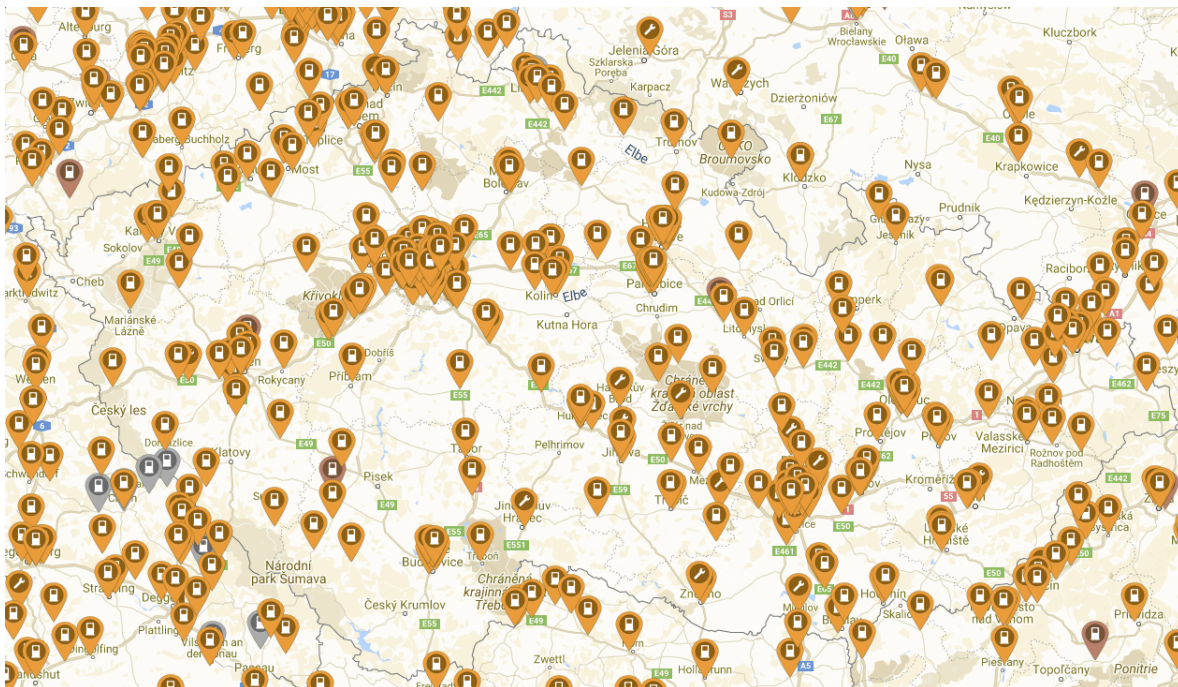
Většina stejnosměrných dobíjecích stanic v České republice má dobíjecí výkon 50 kW, tento výkon je navíc možno použít pouze na jednom ze dvou konektorů (zpravidla CCS2 a CHAdeMO). Druhý může být zapojen, ale není sepnut, dokud se dobíjení prvním konektorem neukončí. V České republice jsou v současné době 2 dobíjecí stanice IONITY (350 kW) a 26 Tesla superchargerů na 4 lokacích s výkonem do 150 kW.

Většina vozů limituje dobíjení trakčního akumulátoru pouze palubním napětím. To není shodné s maximálním napětím technologie, a proto je dobíjecí výkon zpravidla nižší, než jsou schopnosti stejnosměrných stanic. Například maximální palubní napětí Peugeotu iOn je 360 V a používá k stejnosměrnému dobíjení konektor CHAdeMO, který je proudově omezen na 125 A. Proto maximální výkon dobíjení bude 45 kW. Reálně bude výkon nižší díky drobné výrobní odchylce článků trakčního akumulátoru a nutnosti nepřekročit maximální napětí na každém z nich. Navíc špičkový výkon bude při dobíjení tohoto vozu jen několik vteřin. Pak přejde dobíjecí cyklus z režimu konstantního proudu do režimu konstantního napětí a bude postupně snižovat proud a tím i výkon. Další limitací dobíjecího výkonu je teplota akumulátoru. U většiny moderních BEV lze za cenu ztráty nevelkého množství uložené elektrické energie temperovat akumulátor. Netemperovaný akumulátor může výrazně ovlivnit rychlost dobíjení na stejnosměrných dobíjecích stanicích, výkon a také dojezd. Při nízkých teplotách je možno využít méně uložené energie z trakčního akumulátoru jak udává například (Liu et al., 2013). BMS zpravidla neumožní dobíjení promrzlých nebo přehřátých článků plným výkonem, kvůli jejich ochraně a prodloužení jejich životnosti.

V reálných podmínkách se výrobci BEV snažili, aby se doba dobíjení pohybovala mezi 30 a 45 minutami pro dobití z 10 na 80 % SoC. S rostoucí kapacitou akumulátorů a při stávající infrastruktuře tento čas může narůst. Například Tesla model 3 s 75 kWh akumulátorem může na Tesla superchargerech V3 (250 kW) dobít 80 % kapacity akumulátoru za cca 30 minut. Tatáž Tesla na standartní 50 kW dobíjecí stanici bude 80 % kapacity dobíjet přes hodinu. Hyundai Kona s 64 kWh akumulátorem bude na dobíjecí stanici s výkonem alespoň 80 kW 80 % kapacity dobíjet maximálním výkonem 77 kW cca 45 minut. Pokud bude dobíjet na 50 kW stanici, bude dobíjet přibližně hodinu. Nejrychlejší se jeví dobíjení nového Tesla model S long range, který za 25 minut doplní dostatek energie k překonání dalších 400 km (průměrnou spotřebou).

V ČR je dle serveru nabijto.cz 223 rychlodobíjecích stanic (stav ke 4. 2. 2021). Největší vzdálenost místa v České republice od České rychlodobíjecí stanice je cca 30 km. Mapa pokrytí těmito dobíjecími body je na obrázku 3.4.





Obrázek 3.4: Mapa pokrytí ČR stejnosměrnou dobíjecí infrastrukturou dle serveru nabijto.cz ke 4. 2. 2021.

### 3.2.3 Budoucnost vývoje dobíjecích stanic

Na začátku roku 2021 měla Česká republika 223 stejnosměrných rychlodobíjecích stanic a každý měsíc přibývají nové. U obchodních center, benzínových pump, dálnic, transformačních stanic nebo čistých zdrojů energie. Dle dat ministerstva dopravy bylo na konci roku 7 637 registrovaných BEV, z toho pouze 3 774 v kategorii M1 (osobní automobil). Ostatní registrovaná bateriová vozidla byla v počtu 3 510 v kategorii L (motocykly) a 326 v segmentu užitkových vozidel, několik dalších kusů bylo v jiných kategoriích. Pouze výjimky v kategorii L mají možnost stejnosměrného dobíjení, a proto je možno o nich pro využití na stejnosměrných stanicích neuvažovat. Stejně tak je možno zanedbat PHEV, protože ty ve většině případů nevyužívají stejnosměrné, ale pouze střídavé dobíjení. Na druhou stranu některá BEV (například Renault Zoe, Smarty, či první VW e-Golf) nemají možnost využívat stejnosměrné dobíjení. Dle dat SDA přibylo v letech 2017–2019 celkem 989 PHEV. V roce 2020 přibylo 3 262 BEV a 1 978 PHEV. Velký nárůst v obou odvětvích zapříčinila zejména firma Škoda, která registrovala 1 684 BEV a 952 PHEV. Mezi tyto registrace se řadí i 741 vozů značky Enyaq, které jsou zatím pouze v testování a mají být v prodeji až ve druhém čtvrtletí roku 2021. Celkem se tedy na začátku roku 2021 pohybovalo po České republice přibližně 7 389 vozidel s možností dobíjet na stejnosměrné dobíjecí stanici. Vzhledem ke statistikám, že se 80–85 % dobíjení děje doma (Hardman et al., 2018)(Neubauer; Wood, 2014), je množství maximálně 20 % dobíje-

ných vozidel, tedy přibližně 1 478. To znamená zaokrouhleně 7 BEV na jednu stanici. Čas stejnosměrného rychlodobíjení se za normálních podmínek pohybuje mezi 20 a 45 minutami, takže při nejhorsím scénáři je každá ze stanic vytižena necelých 5 hodin denně. Kritickým místem této úvahy je ohleduplnost lidí, a to jak uživatelů BEV, kteří někdy blokují stanice či dobíjecí porty, tak majitelů ICE vozidel, kteří tzv.: „ICEingem“ úmyslně blokují dobíjecí stanice. Dalším kritickým místem výpočtu je mrazivé počasí, protože v tuhých mrazech ve starších BEV bez tepelného managementu akumulátoru trvá dobíjení až dvojnásobek času. V ČR je rovněž 752 střídavých stanic a veřejných zásuvek. Celkový počet BEV a PHEV je 13 866. Poměr aut do zásuvky k veřejným střídavým zásuvkám je tedy 18,4.

V Norsku bylo na konci roku 2020 346 921 BEV, 142 858 PHEV (Statista, 2021a) a celkově 4 623 stejnosměrných dobíjecích stanic (Statista, 2021b). Při stejné metrice, jaká byla použita výše pro ČR, je doba vytižení jedné stanice přes 11 hodin. Počet BEV + PHEV je 489 779, střídavých přípojných bodů je 11 450 (Statista, 2021b). Poměr vozidel do zásuvky ku střídavým zásuvkám je tedy 42,8. Vytíženost norských stejnosměrných stanic ku poměru k registrovaným BEV je o polovinu vyšší, a teoretická obsazenost norských střídavých dobíjecích stanic a veřejných zásuvek je 2,3 krát vyšší než v ČR. I přesto prodeje elektromobilů v Norsku za rok 2020 poprvé v historii překonaly prodeje ICE vozidel (Reuters, 2021-01-05).

Achillovou patou rozšíření elektromobility v České republice je dobíjení BEV na sídlištích. V 80 000 panelových domech s 1,2 mil bytů žijí dle dat ČSU 3 mil obyvatel (ČTK, 2020). Panelová výstavba nebyla konstruována na parkování vozidel nájemníků před domy, a proto jsou sídliště často přeplněná vozidly. Jediné řešení, které se současnou optikou nabízí, je instalace zásuvek do těles veřejného osvětlení. V České republice je 1,4 milionu svítidel (Zenkner, 2016-11-23), některé z nich byly konstruovány na 400W sodíkové nebo halogenidové výbojky. V dnešní době jsou kvůli trvanlivosti a účinnosti většinou osazovány 250W sodíkovými výbojkami. V menších svítidlech na sídlištích adekvátně nižším výkonem. V případě nahrazení těchto výbojek ekvivalentními LED svítidly, dokáže každé svítidlo z ušetřeného výkonu dobíjet elektromobily. Z kapitoly 3.1 je zřejmé, že průměrná spotřeba BEV kolísá mezi 12 a 25 kWh na 100 km a také že průměrný denní nájezd průměrného českého řidiče je přibližně 29 km denně. Pokud tedy započteme spotřebu BEV 20 kWh/100 km a přepočteme ji na denní nájezd 29 km, dostaneme potřebnou dodanou energii každou noc 5,8 kWh. Pokud počítáme zbytkový výkon svítidla 150 W a 10 hodinovou dobu dobíjení, potřebujeme na jedno vozidlo zbytkový výkon čtyř svítidel celou noc. Teoreticky tak lze nabít akumulátory přibližně 360 000 BEV na denní nájezd za pomoci rezervovaného výkonu pouličních svítidel za noc. Další statisíce by šly dobíjet během dne. V ČR bylo 5 924 995 osobních vozidel na konci roku 2019 (Dle dat z MDČR v příloze A.3). Dle tohoto výpočtu lze konstatovat, že přibližně 6 % vozového parku by mohlo za předpokladu investice do pouličního osvětlení dobíjet plně elektrická auta v noci a dalších 14 % přes den. Autor této práce se účastnil tohoto výzkumu na půdě univerzity (Jenšíková, 2015). V posledních letech v několika Českých a Slovenských městech běží projekty, které



aplikují tuto strategii. Například Praha (Kopecký, 2020-09-09) a Slovenská města Sabinov a Dolný Kubín (Skokan, 2021-01-15).

Kritických míst této úvahy je mnoho. Jednak se zakládají pouze na poznatcích projektantů elektrických zařízení, protože nikde nejsou souhrnná a celistvá data o veřejném osvětlení. Veřejné osvětlení je totiž v jurisdikci měst, vesnic a soukromých majitelů. Neexistuje tedy centrální registr. Například i vodiče k napájení veřejného osvětlení jsou různě definovány dle několika odlišných norem. Vzhledem k absenci dat o stáří není možnost potvrdit, zda by vodiče pro dobíjení elektromobilů stačily. Obzvláště za předpokladu, že většina elektromobilů akceptuje dobíjení až od výkonu cca 1,2–1,5 kW. Ačkoliv to výpočet výše neovlivní, bylo by k přepínání aktivních zásuvek potřeba nadřazené řízení. Navrhovaná náhrada by si vyžádala obrovské investice do infrastruktury. I za předpokladu dostatečné dimenzace vodičů by bylo potřeba vyměnit svítidla díky jiným světelným charakteristikám LED svítidel. Zároveň by s touto záměnou bylo potřeba zajistit dobíjecí body, tedy zásuvky. Otázkou je také způsob platby za službu. Platební terminál díky své ceně, velikosti a nákladnému provozu nepřipadá v úvahu. I aktivace na kartu či telefonem by systém nesmírně prodražila. Nabízí se tak řešení paušálním poplatkem a univerzálním klíčem k zásuvkám. Dalším kritickým místem výpočtu je fakt, že značná část pouličního osvětlení nemá možnost, aby u něj bylo zaparkováno vozidlo. Navzdory těmto kritickým místům je toto řešení dostačující při současném stavu Českého vozového parku, který čítá necelých 14 000 vozidel do zásuvky.

### 3.3 Ekonomická stránka BEV

Pro koncové uživatele je bezesporu jednou z největších překážek k masovému rozšíření elektromobility cena prodávaných vozů. Srovnání není jednoduché, protože jen několik modelů vozidel se současně vyrábí v elektrické a neelektrické variantě. V minulosti bylo možno srovnat Škodu CitigoE, VW e-UP, VW e-Golf, Fiat 500e nebo Hyundai IONIC electric s jejich spalovacími protějšky. Většina z těchto vozů je v současné době stažena z prodeje. Pro srovnání tedy může posloužit Hyundai KONA electric v různých variantách výbavy viz tabulka 3.3 zpracována z (Hyundai, 2021).

Tabulka 3.3: Srovnání ceny benzínového a elektrického vozidla Hyundai Kona.

Hyundai Kona	Elektrická verze (Kč)	Benzínová verze (Kč)	Rozdíl ceny (%)
Základní výbava	799 990	399 990	200
Srovnání základní výbavy	799 990	459 990	174
Vyšší dojezd	1 049 990	539 990	194
Maximální výbava	1 308 180	740 180	177

Jak je vidět v tabulce, rozdíl v ceně je až dvojnásobný. Nicméně v současné době je provoz vozidel s elektrickým pohonem mnohonásobně levnější (viz následující kapitoly).

### 3.3.1 Srovnání stejných vozů s elektrickým a spalovacím pohonem

Spotřeba elektrické Kony s vyšší kapacitou akumulátoru je 13,2 kWh/100km a při započtení účinnosti palubní dobíječky je 14,7 kWh/100km (EV-databaze, 2019a). Dle ceníku ČEZ pro elektromobilitu D27d (ČEZ, 2021) je cena za MWh při nízkém tarifu po započtení ceny za silovou elektřinu, ceny za distribuci, služeb a daně z elektřiny celkem 2 066,09 Kč. K této částce je potřeba připočítat ještě cenu za rezervovaný výkon a stálou platbu za dodávanou elektřinu. Celkově 182,91 Kč každý měsíc. Celková cena za MWh se bude pro rodinný dům s průměrnou spotřebou pohybovat okolo 2 100 Kč a tedy 2,1 Kč/kWh. Výpočet ceny za km je tak součinem ceny nízkého tarifu a spotřeby elektrického vozu včetně ztrát při dobíjení. Celkově 30,87 Kč/100km, což znamená cca 0,3 Kč/km. Toto platí pouze při dobíjení nízkým tarifem v domácím prostředí. Přidanou hodnotou je fakt, že při nízkém tarifu se dobíjí nejen vozidlo, ale rovněž tuto levnou energii využívá celý dům. Jsou tak známy případy, kdy díky pořízení elektromobilu a s ním spojeného tarifu od energetické společnosti, klesla roční částka za elektrickou energii celého rodinného domu, například (Burkovic, 2018). Tato přidaná hodnota se však špatně kvantifikuje do výpočtu, a proto nebude zohledněna.

Benzínová Kona 1,6 gLI (tedy motor srovnatelný špičkovým výkonem s elektrickým protějškem) má kombinovanou spotřebu cca 6,7l/100km (Gazeta, 2018). Průměrná cena za 1l naturalu 95 byla v období 2/2019 – 2/2020, tedy před krizí způsobenou pandemií COVID-19, 31,8 Kč/l (Český statistický úřad, 2020). Přepočtená cena za kilometr tedy vychází na 2,13 Kč/km. Dle servisních intervalů tento benzínový motor vyžaduje výměnu celých 4,5l oleje a olejového filtru každých 10 000 km (Hyundai, 2019). Vzhledem k tomu, že uživatel většinou chce udržet záruku na vůz, která je podmíněna plněním těchto prohlídek a výměn v autorizovaném servisu, bude náklad čistě na originální olej a filtr cca 86,2 USD, což v současném kurzu silné koruny vychází na 1 830,39 Kč každých 10 000 km (v ceně není započítána práce). Cena za kilometr se pak zvýší na cca 2,31 Kč. Další náklady zahrnují například zapalovací svíčky (70 000 km) aj. Pochopitelně pro všechna vozidla jsou stejné náklady za kabinový filtr, pneumatiky a brzdovou kapalinu. Stran brzdových soustav lze obecně říct, že vozidla s elektrickým pohonem a rekuperací používají mechanické brzdy daleko méně, avšak kvantifikovat tyto náklady je poměrně složité, neboť záleží na stylu jízdy. Příliš úsporná jízda v BEV může vést až k zarezivění brzdových systémů a nutnosti výměny. Z těchto důvodů se například Enyaq vrací na hnané nápravě k technologicky starším bubnovým brzdám, které jsou na údržbu méně náročné.

Rozdíl mezi náklady na kilometr benzínové a čistě elektrické verze Hyundai Kona jsou tedy cca 2 Kč. Při zohlednění vyššího dojezdu a maximální výbavy (z tabulky 3.3) dojde k vyrovnání

celkových nákladů na vlastnictví po cca 253 respektive 282 tisících kilometrech. Dle poznatků z kapitoly 3.1 by průměrný český řidič tohoto bodu zlomu dosáhl až za 24, respektive 27 let, což je daleko za životností většiny komponent dnešních vozů. Pochopitelně by se na takto dlouhém časovém horizontu objevily výhody BEV spočívající v levném servisu, akumulovala by se úspora za pojištění, emisní zkoušky, dálniční poplatky a další... Při nízkém nájezdu se tedy s ohledem na vysokou pořizovací cenu nákup tohoto BEV nevyplatí. Z praktických zkušeností komunity nutno dodat, že i elektrická Kona se dá v nejvyšší výbavě koupit za 800 000 Kč. Tato nákupní cena je ovlivněna dotacemi ze stran autosalónů, které mají povinnost prodat několik BEV ročně.

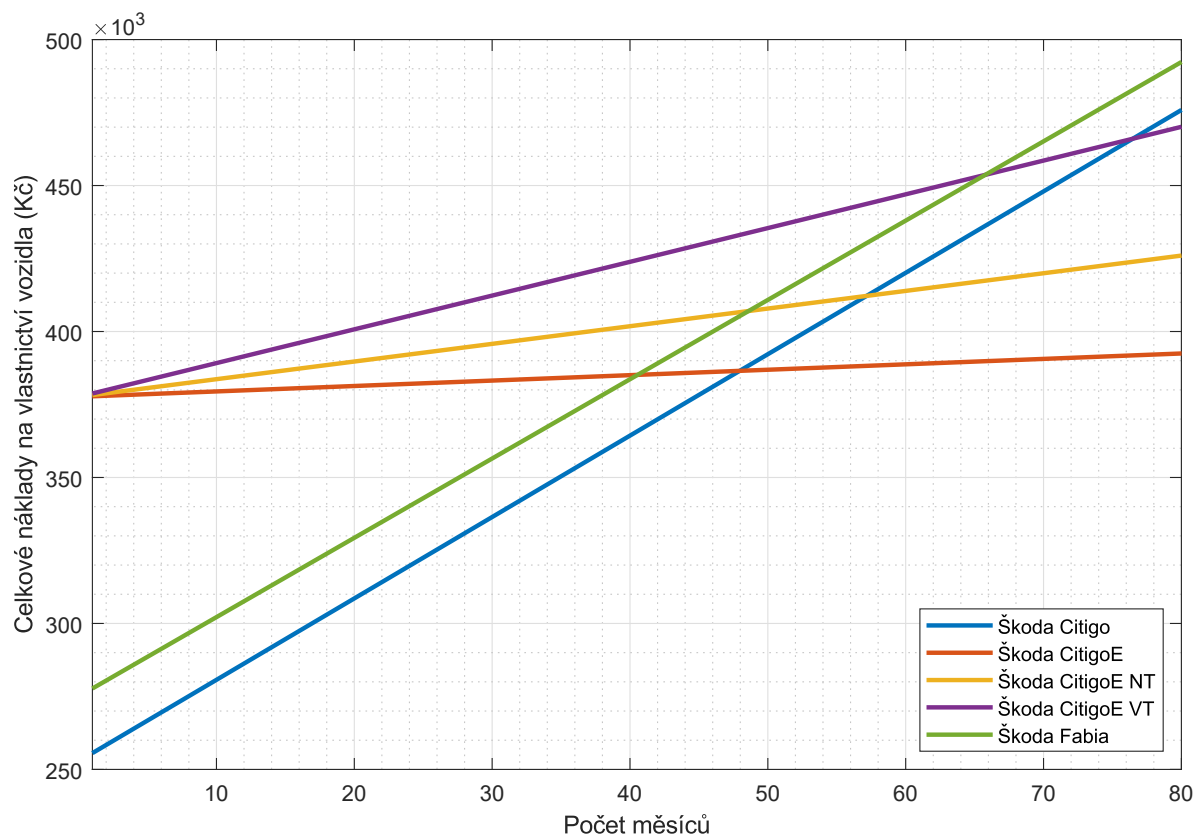
Jiný výsledek by byl získán v případě vyššího denního nájezdu. V případě Kony ve flotile vozidel VŠB se v pracovních dnech ujede 170 km, což za rok znamená 41 300 km. Pokud uvažujeme 50 000 km ročně, lze bodu vyrovnání celkových nákladů dosáhnout po 5–6 letech. V krajním případě využití maximálního dálničního dojezdu elektrické Kony, a to každý den, tento bod nastane po cca 2,5 letech. Záruka na trakční akumulátor je 8 let nebo 160 000 km.

### 3.3.2 Škoda Citigo – případová studie

Autor této práce byl požádán o výpočet ekonomické bilance uvažovaného BEV. Jde o srovnání celkových nákladů na vlastnictví vozidla pro elektrické Citigo a benzínovou variantu stejného vozu. Jelikož se mělo jednat o nová vozidla, náklady na servis by měly být minimální. Uživatel žije na Bruntálsku na vesnici, kde nemá tak nízkou cenu za nízký odběrový tarif. Zároveň toto sekundární auto nepotřebuje dálniční známku. Cena pojištění pro benzínovou variantu je značně nižší než v podmínkách velkoměst. Náklady na km byly vypočteny z normované spotřeby u Citigo a ceny paliva v danou chvíli a u CitigoE z ceny elektřiny (zaslané přímo s prosbou) a normované spotřeby. Denní nájezd byl vypočten ze zadaného ročního nájezdu 18 000 km. Do srovnání v tabulce 3.4 byla také přidána ke srovnání Škoda Fabia v nejnižší konfiguraci. Sloupec CitigoE je složen z autorovy reálné ceny za km, ve které je významně zastoupeno dobíjení zdarma, například u OC. E Citigo NT a VT jsou výpočty pro dobíjení z nízkého a vysokého tarifu ceny elektrické energie.

Tabulka 3.4: Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vybraných vozů: Škoda Citigo, CitigoE, Fabia. Koupě nových vozů.

Průměr km / den	49,28				
Zkoumaný vůz	Citigo	CitigoE	CitigoE NT	CitigoE VT	Fabia
Cena vozu	252 800	377 620	377 620	377 620	275 000
Náklady na km	1,530	0,033	0,337	0,710	1,481
Pojištění	4 317	1 286	1 286	1 286	4 317
Emisní zkouška	1 000	0	0	0	1 000



Obrázek 3.5: Srovnání celkových nákladů za vlastnictví vybraných vozů: Škoda Citigo, CitigoE, Fabia. Koupě nových vozů.

Dle výpočtu v grafu 3.5 se elektrické Citigo, dobíjené výhradně z NT, svými náklady na vlastnictví srovná se Škodou Fábíí za 49 měsíců a s benzínovým Citigo za 57 měsíců, tedy přibližně 5 let. Záruka na akumulátor elektrického Citigo je 8 let nebo 160 000 km.

### 3.3.3 Nákup ojetého elektromobilu

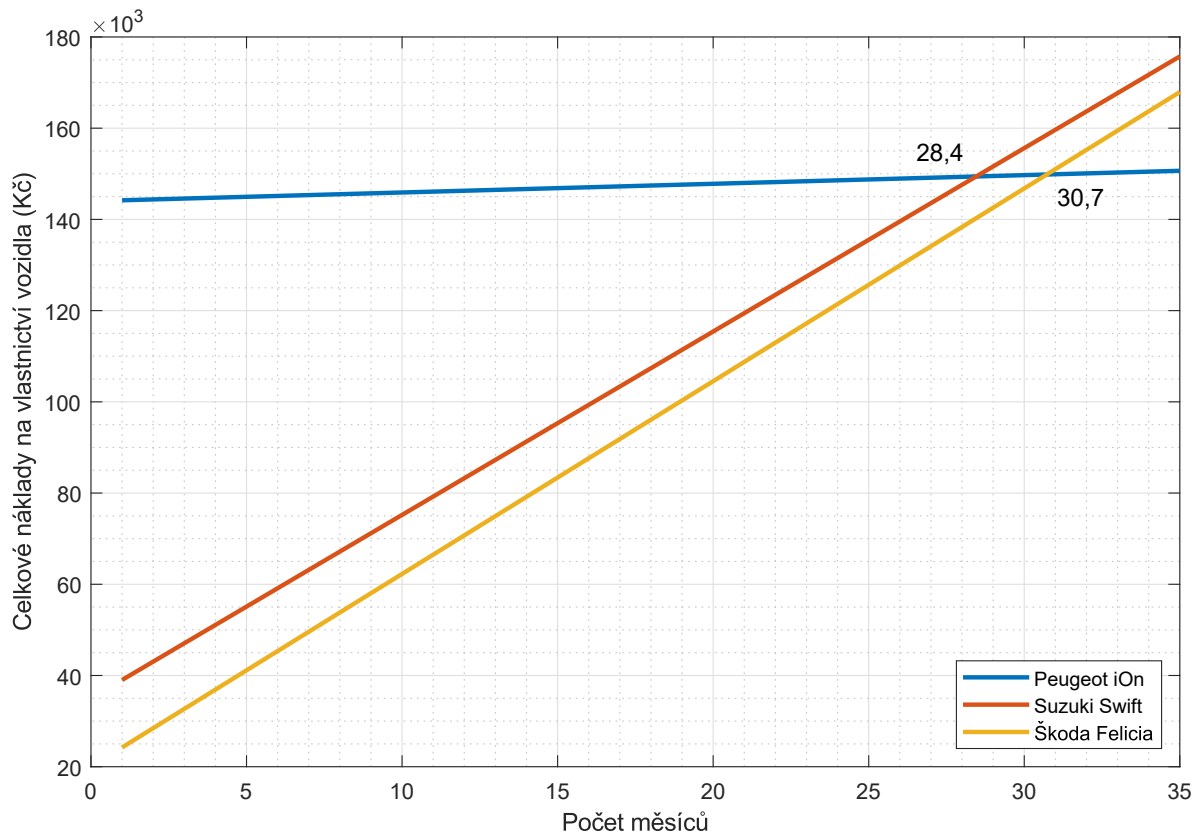
Autor této práce si údaje o provozu všech svých vozidel zapisoval, vyhodnocoval náklady, spotřebu, ujeté km a další statistická data. Díky těmto cenným informacím a datům o elektromobilitě si mohl před nákupem vlastního bateriového elektromobilu srovnat celkové náklady a vypočítat bod vyrovnání nákladů na vlastnictví vozidel.

V tabulce 3.5 jsou obsažena reálná data z dlouhodobého provozu. Položka „Servis“ vychází z vlastních dat, položka „Pojištění“ je nabízené povinné ručení a položka „Cena za kilometr“ jsou skutečné náklady zaplacené na čerpacích stanicích za pohonné hmoty. Průměrný nájezd km/den je průměr ze všech osobních vozů. Vzhledem k pandemii COVID-19 se průměr nájezdu s elektrickým vozidlem snižuje a bod srovnání nákladů za vlastnictví vozidla se posouvá dál v čase.

Tabulka 3.5: Srovnání celkových nákladů na vlastnictví vozů: Škoda Felicia, Suzuki Swift, Peugeot iOn. Koupě ojetých vozů.

Průměr km / den	41,29		
	Felicia	Swift	iOn
Cena vozu	20 000	35 000	144 000
Náklady na km	2,37	2,33	0,03
Pojistění	7 200	7 200	1 287
Servis	6 900	5 000	558
Dálniční poplatky	1 500	1 500	0
STK emise	1 000	1 000	0

V grafu 3.6 je vidět, že uvažovaný Peugeot iOn je oproti předchozím vlastněným vozidlům (Škoda Felicia 1,3MPI; Suzuki Swift 1,3) dražší na pořízení, ale má levnější provoz. Díky těmto vlastnostem je bod vyrovnání celkové ceny na vlastnictví vozidel už ve 28. respektive 31. měsíci. Tedy po dvou a půl letech bude vyrovnána celková cena a elektromobil začne skutečně šetřit finance. Zároveň jeho zůstatková cena klesá pomaleji než u benzínových vozidel.



Obrázek 3.6: Srovnání celkových nákladů za vlastnictví vybraných vozů: Škoda Felicia, Suzuki Swift, Peugeot iOn. Koupě ojetých vozů.

Výpočet má kritická místa. Vzhledem k nadprůměrnému ročnímu nájezdu a specifickým (nikoliv však ojedinělým) podmínkám provozu elektromobilu, zejména množství bezplatných dobíjecích stanic v Ostravě, se situace bude lišit pro užívání za jiných podmínek. Rovněž lze konstatovat, že jsou v současné situaci ceny pohonných hmot nižší, než jaké byly během provozování porovnávaných vozů, a proto se celý výpočet může o jednotky měsíců lišit.

### 3.3.4 Provoz BEV pouze z dobíjení na placených stejnosměrných stanicích

Pro kompletní a objektivní srovnání je potřeba vypočítat hodnotu ceny za km pro vozidla, která nemají přístup k neplacené dobíjecí infrastruktuře. Pro srovnání byly vzaty v úvahu údaje o vozidle Peugeot iOn a jeho denním nájezdu. Dlouhodobá spotřeba vozidla se pohybuje kolem 12 kWh/100km, což vzhledem k dennímu nájezdu cca 40 km (viz výše) a průměrnému 30dennímu měsíci jde kvantifikovat jako 144 kWh/měsíc. Pro tuto spotřebu se nejvíce vyplatí dobíjení přes infrastrukturu ČEZu s jejich tarifem „Obchodní cestující“, kde cena za kWh je 4,5 Kč. Celková cena za km je pak 0,54 Kč/km a bod vyrovnání cen dle předchozích výpočtů je 32 respektive 35 měsíců. To je o pouhé 4 měsíce více než při minimálních nákladech pro dobíjení (viz výše). V příloze v tabulce B.2 je srovnání velkých dodavatelů a provozu různých BEV. V tabulce chybí IONITY, zejména proto, že její infrastruktura není celorepubliková, vlastní pouze několik UFC dobíjecích stanic v ČR. Cena za kWh je 21 Kč (Ionomy, 2020). Také chybí dobíjecí stanice Tesla supercharger, které zatím nemohou využívat jiné automobily než Tesla. Cena za kWh je 7,9 Kč (Tesla, 2021). Dále chybí výčet stanic z portálu EVmapa.cz, který sdružuje soukromé dobíjecí stanice, jejichž cena se liší. Od 1. 4. 2021 mění PRE cenovou politiku. Více zde (PRE, 2021b).

I přes obrovský rozdíl pořizovací ceny BEV a ICE vozu lze při rozumné volbě vozidla vzhledem k nájezdu uživatele dosáhnout finanční úspory v horizontu několika let.

### 3.3.5 Životnost trakčního akumulátoru

Jednou z největších ekonomických obav potenciálního uživatele je výměna trakčního akumulátoru. Trakční akumulátor je nejdražší součástí BEV. Vzhledem ke zkušenostem uživatelů s životností akumulátorů ve spotřební elektronice a k její nerentabilní opravě této elektroniky po konci životnosti akumulátoru jsou tyto obavy na místě.

Cena nového Peugeotu iOn kolísala mezi 600 000–900 000 Kč. Cena trakčního akumulátoru pro výměnu je dle autorizovaného servisu 180 000 Kč, což převyšuje současnou tržní hodnotu vozu. Akumulátor výše zmíněné Hyundai Kona s vyšším dojezdem stojí 1 276 340 Kč, což téměř vyrovnává cenu nového vozidla (Vaculík, 2021). Dle zdroje (Schrader, 2021) stojí 75kWh akumulátor Tesly modelu 3 téměř 340 000 Kč, což je čtvrtina ceny nového vozu. Toto vše je teorie. Do Peugeotu iOn a jeho sesterských vozidel lze koupit kompletní trakční akumulátor s nízkým nájezdem za 40 000 Kč a výměna trvá pouze několik hodin. Stejně tak je trh zásoben

akumulátory první generace vozidel Nissanu Leaf a dalších starších BEV. Naopak BEV s technologicky vyspělejšími akumulátory tyto problémy neřeší. Nizozemský projekt založil online tabulku, kde majitelé Tesel dobrovolně sdružují informace o svých akumulátorech (*Tesla Battery Survey*, 2021). Dle těchto údajů, čítajících přes 1 600 záznamů od více než 200 uživatelů, se degradace akumulátoru ve vozidlech Tesla všech modelů a všech let výroby pohybuje o 5 % při 80 500 km a 10 % při cca 305 000 km viz. graf C.2.

Průměrnému českému řidiči by tato degradace trvala téměř třicet let používání vozidla. Za obecně uznávaný dobrý stav zdraví (SoH) akumulátoru se považuje 70–80 %. Pokud tedy linearizujeme nájezd a degradaci, znamená to, že po dosažení 80 % SoH bude mít vozidlo nájezd 610 tisíc km a při 70 % 915 tisíc km. I tento celkový nájezd nebude znamenat nefunkční akumulátor, ale pouze pokles jeho SoH, tedy přeneseně kapacity, což se adekvátně projeví na hodnotě dojezdu. Po ujetí celkových 915 tisíc km se sníží dojezd na jedno nabití z původních 500 na 350 km. Neméně úspěšnou životnost akumulátoru má také výše zmíněná (Vaculík, 2021) Hyundai Kona, která po téměř 40 000 km nevykazuje znatelný pokles SoH.

Vysokou životnost akumulátorů potvrzuje i teorie. Pakliže články LGX E78 nejnovějších akumulátorů používané ve vozidlech Renault Zoe, VW ID3 či škoda Enyaq mají deklarovaný počet cyklů do 80 % SoH 2000 a vozidla mají reálný dojezd 250–400 km, tak součinem těchto čísel získáme nájezd 500 000–800 000 km. Toto číslo avšak není konečné. BMS každého BEV omezuje hranice nabití a vybití vozidla tak, aby prodlužovala životnost akumulátoru. Rovněž se uživatelé málokdy stane, aby vozidlo úplně vybil. Při používání vozidla v režimu 20–80 % SoC lze docílit až trojnásobného počtu cyklů. Tedy 80 % SoH bude dosaženo při 1,5–2,4 milionech kilometrů. Tato neúměrná životnost v relaci se zastaralostí a opotřebením zbytku vozidla bývá vyvažována jinými vlastnostmi, které mohou životnost akumulátoru zkrátit. Médiem pro výměnu tepla v trakčním akumulátoru Renaultu Zoe je vzduch. Tím se liší od jiných BEV, které k výměně tepla v akumulátoru používají kapalinu. Tím sice Zoe získalo jeden z nejlepších poměrů energie vztažené na kilogram hmotnosti akumulátoru, ale přišlo o možnost dobíjení vysokým výkonem a o efektivní vyhlazování tepelných rázů v akumulátoru. Naopak Tesla ve svých vozech předešlává akumulátor k teplotám až 60 °C, aby byly články schopny pojmout vysoké výkony za krátký čas. Tento způsob dobíjení byl patentován již v roce 1993 (Patino et al., 1993-08-31). Tato strategie zásadně snižuje nabíjecí čas a teplotní změny v akumulátorech, avšak dle (Asakura et al., 2003) může ovlivnit jejich životnost. I přes tyto strategie automobilky poskytují sebejisté záruky na trakční akumulátory viz tabulka 3.6.

Je tedy pravdou, že náklady na akumulátor jsou v případě výměny obrovské, nicméně teoretická i statistická životnost nových lithium-iontových článků fakticky přesáhne životnost zbytku vozu. Akumulátor pak může nadále sloužit ve stacionárních uložkách, což prospívá ekologické i ekonomické bilanci vozu.

Tabulka 3.6: Záruky na trakční akumulátory BEV. Převzato z (CarAdvice, 2020-08-23).

Vozidlo	Záruka (roky)	Záruka (km)
Tesla model S/X	8	240 000
Tesla model 3 SR	8	160 000
Tesla model 3 LR/P	8	193 000
Renault Zoe	5	150 000
Porsche Taycan	8	160 000
Nissan Leaf	8	160 000
Mini Electric	8	160 000
Mercedes-Benz EQC	8	160 000
Jaguar I-Pace	8	160 000
Hyundai Ionic	8	160 000
Hyundai Kona Electric	8	160 000
BMW i3	8	100 000
Audi e-tron	8	160 000

### 3.3.6 Ekonomika BEV v budoucnu

V roce 2020 představila Dacia elektrická vozidla, která se mají v České republice prodávat od roku 2021 s cenou začínající na 400 000 Kč, s velmi působivými městskými parametry (fDrive, 2021a). Tesla na své konferenci Battery day oznámila vývoj levného elektromobilu. Cena tohoto vozu se má pohybovat kolem 25 000 USD, tedy 530 000 Kč. Nedávno byly zveřejněny jeho ekologické štítky a odhaduje se, vzhledem k předchozím zkušenostem, že by vůz na trh mohl dorazit už příští rok (fDrive, 2021b). Při odhadované spotřebě okolo 11 kWh/100km může provoz těchto vozidel stát přibližně 0,23 Kč/km při domácím dobíjení.

Dle informací celní správy (Celní správa, 2021) byla v roce 2019 spotřební daň z pohonných hmot přibližně 93 miliard korun. To činí cca 1 523 miliard 6,1 % z celkového příjmu státního rozpočtu (MFRCR, 2019). Navíc PHM jsou zatíženy i dalšími daněmi, tedy při ceně 30 Kč/l nafty je daňová zátěž 54 % ceny (Rod, 2019). Tyto finance by ve státním rozpočtu chyběly. Různé státy zavádějí opatření ke kompenzaci tohoto výpadku financí. Například uvažované vyšší zatížení elektrické energie spotřební daní by mělo plošný dopad na obyvatele. Austrálie se vydala cenou plošné silniční daně 0,025 AUD/km pro BEV a 0,02 AUD/km pro hybridní elektrická vozidla (HEV) (PVMagazine, 2020).

Stejněsměrné rychlodobíjecí stanice za posledních několik let zdražují. Například síť dříve zmiňovaných dobíjecích stanic IONITY prodává jednu kWh za 21 Kč (Ionity, 2020), Eon zdražuje z 6 na 6,9 Kč (EON, 2020) a ČEZ nastavuje paušální politiku (ČEZ, 2020a). Tento trend bude nejspíše s narůstajícím počtem elektromobilů pokračovat.

Je pravděpodobné, že se stoupajícím počtem BEV a PHEV budou redukovány pobídky, například v ČR to je osvobození od dálničních poplatků. Naopak bezplatný vjezd do měst



bude pravděpodobně trvat dále a k Praze a Ostravě se časem přidají další města. Ta budou finančně zvýhodňovat čistou mobilitu v centrech měst jako nástroj ke zlepšení smogové situace.

Dalším finančním zvýhodněním elektromobilů může být zapojení vozu do systému Vehicle to grid (V2G). Takový vůz funguje jako virtuální elektrárna a v době nízké spotřeby v síti se dobíjí, a naopak v době špiček dodává energii do sítě. Tímto nejen pomáhá stabilizovat síť, ale rovněž vydělává peníze, a tak pomoci s návratností investice do BEV (Das et al., 2014).

## 3.4 Bezpečnost BEV

Dle výsledků agentury euro NCAP je nejbezpečnějším autem roku 2020 Elektrický VW ID3, na pátém místě je pak plně elektrická Mazda MX-30 a v seznamu se dobře umístila i Honda e (EuroNCAP, 2021c; EuroNCAP, 2021b; EuroNCAP, 2021a). Stejná agentura zařadila do první pětky nejbezpečnějších vozů v minulých letech Mercedes Benz EQC. Tesly patří dlouhodobě mezi nejbezpečnější osobní vozidla a trvale figurují v seznamech pro posádku nejbezpečnějších aut vůbec (WPVI, 2018-10-14; IIHS-HLDI, 2020; Carlogos, 2020). BEV mají dobré umístění v Euro NCAP, ale i NHTSA je hodnotí většinou maximálním hodnocením (NHTSA, 2016-06-10). Nevýhodou všech aerodynamicky tvarovaných BEV je nízké skóre ochrany chodců. Naopak v kategorii asistentů BEV, a zejména Tesla, vede. BEV mají tak dobré výsledky zejména vlivem absence vysoce hořlavých kapalin, dostatkem prostoru pro robustní deformační zóny, ale zvláště díky nízko umístěnému těžišti ve středu vozu. To je způsobeno především umístěním trakčního akumulátoru, který často činí přes 30 % hmotnosti vozidla, ve spodní části vozidla. Další výhodou je možnost umístění motoru přímo v ose hnaných kol, čímž se optimalizuje jak poloha těžiště, tak výkon a účinnost. Další výhodou je okamžitá reakce motoru. Asistenti mohou reagovat daleko rychleji a přesněji, než je tomu u ICE vozů s převodovkou, spojkou a turbodmyčadlem. V konečném důsledku tak BEV prakticky nehrozí převrácení, chovají se velmi stabilně na kluzkých površích, a i přes častý zadní náhon nemají tendence ke ztrátě kontroly trakce. Zásadní bezpečnostní nevýhodou, alespoň podle veřejného mínění, je trakční akumulátor s obrovskou uskladněnou energií a tendencí hořet velmi intenzivním plamenem.

### 3.4.1 Požár trakčního akumulátoru

Je pravda, že požár lithium-iontových akumulátorů je problematický zejména tím, že se články dokáží při vysoké teplotě samy zásobovat kyslíkem. Z tohoto důvodu jsou těžko uhasitelné a inklinují k opakovanému samovznícení. Zatímco benzínová auta prošla staletým vývojem bezpečnosti, elektromobilita v kombinaci s lithium-iontovými články je novinkou. První komerční lithium-iontové články se začaly pomalu objevovat na přelomu tisíciletí (Scrosati, 2011), sku-

tečně masového nasazování se dočkala až při nasazování do elektrických vozidel. Z těchto důvodů je tento přibližně 15 let starý problém často zveličován.

Tyto obavy směřovaly automobilky vyrábějící BEV k tomu, aby usilovně pracovaly na zvýšení bezpečnosti, nouzovém odpojování, ale také školení záchranných složek.

Dle několika vědeckých článků (Sun et al., 2020; Sturk et al., 2015) se při hoření BEV uvolní stejné množství energie jako při hoření ICE vozidla. Na druhé straně, dle prohlášení Elona Muska, se za první miliardu kilometrů vznítilo pouze 5 elektrických vozidel Tesla, což je jedenáctina případů vznícení u ICE vozidel. Ta v USA hoří 55 krát každou ujetou miliardu kilometrů. V článcích (Hanley, 2019-06-03) a (Isidore, 2018-05-17) nejen citují tento výrok, ale také dodávají statistiku z prostředí USA, tedy, že každý den shoří 150 konvenčních automobilů. Bohužel jak vědecké, tak publicistické články se shodují na tom, že pro celistvý názor je zatím příliš brzy, a že reálné výsledky a bezpečnost BEV ukáže až čas. Český článek o těchto číslech a vlivu na bezpečnost vyšel zde (Skořepa, 2019).

Pro vyvrácení pověr o hořících BEV provedla státní zkušebna DEKRA náročné crash-testy v daleko větším rozsahu, než jaké provádí Euro NCAP (Fuglevič, 2019). První generace Nissanu Leaf byla při bočním nárazu zdeformovaná téměř do poloviny vozu, a to včetně trakčního akumulátoru. K žádnému požáru nedošlo. V článku (Baborský et al., 2020) se vyjádřil koordinátor HZS Škody Auto Stanislav Cihelník a mimo jiné uvedl, že elektromobily neznámají větší riziko než ICE vozidla a také, že trakční akumulátor dokáže jednotky hasičů uhasit do 5 minut. Potvrdil také, že hasiči jsou na takové požáry připraveni technicky i výcvikem. Rovněž prezentoval fakta, že dosud v ČR nehořel jediný osobní BEV. Vznítily se pouze jeden hybrid a jeden elektrobus. V obou případech nebyl požár způsoben chybou trakčního akumulátoru. Vzhledem k nízkému počtu provozovaných elektromobilů je absence požárů BEV v ČR pochopitelná.

### 3.4.2 Vybití akumulátoru v koloně

Další nepříjemností, která se dá nazvat bezpečnostním rizikem, je vybití akumulátoru v nehybné koloně v zimních měsících, kdy je potřeba topit nejen pro pohodlí, ale také pro zachování zdraví. Toto riziko hrozí u vozidla na jakýkoliv pohon. Na rozdíl od ICE vozidel při provozu elektromobilu nevzniká dostatek odpadního tepla pro vytápění vozidla. U starších elektromobilů s PTC topením byl příkon topení nárazově až několik kilowatt, při ustálení teploty 1,5–1,8 kW. V případě Peugeotu iOn a jeho 16kWh akumulátoru lze konstatovat, že každá hodina v koloně konzumuje 10 % SoC. U Nissanu Leaf (bez tepelného čerpadla) s 24kWh akumulátorem to je 6,5 % a obdobně u dalších vozů. Je tedy pravda, že dlouhé nehybné kolony s čekací dobou až 8 hodin, které se každý rok vyskytnou, jsou pro tato auta mimo zónu komfortního používání.

Naproti tomu novější BEV jsou vybavena tepelnými čerpadly, která dovedou z jednoho elektrického kW výkonu udělat až 3 kW tepelného výkonu, a tak významně přispívají k úspoře energie v chladném období (Higuchi et al., 2017). Dle měření se dlouhodobý průměr spotřeby takového systému pohybuje okolo 0,65 kWh. Toto, v kombinaci s narůstající kapacitou akumulátorů, významně prodlužuje dobu možnosti komfortního vyhřívání kabiny. Pokud vezmeme v úvahu například Renault Zoe, s využitelnou kapacitou 52 kWh a příkonem topného systému 0,65 kW, tak doba, kterou můžeme pouze topit ve vozidle, je 80 hodin. V BEV Hyundai a Kia je implementována možnost vyhřívát pouze oblast řidiče, a tím zmenšit spotřebu pro topení na polovinu. Například v Hyundai Kona s 64 kWh energie v akumulátoru a dlouhodobým průměrem spotřeby 0,35 kW/h lze topit téměř 183 hodin. Výkon topného systému je regulován podle teploty uvnitř vozu. Lidské tělo dle (Rob Cross, 2009-04-01) bazálně tvoří 80 W tepelné energie, v klidném stavu cca 110 W. Je zřejmé, že se s narůstající posádkou sníží spotřeba BEV pro potřeby vyhřívání. Pokud uvažujeme, že je pro udržování teploty v kabině potřeba 2 kW tepelného výkonu a ve voze budou 4 dospělí, bude potřeba topného výkonu cca 1,56 kW, na což tepelné čerpadlo v ideálních podmínkách spotřebuje cca 520 Wh elektrické energie každou hodinu.

Naproti tomu odpozorovaná spotřeba motoru 2.0 TDI koncernu VW je 0,5 l nafty za hodinu a při používání vyhřívání, ventilátorů, či jiných spotřebičů roste k 0,8 l nafty za hodinu. Běžná velikost nádrže vozidel je 50–70 l. Spotřebou 0,6 l/h vyčerpáme 60 l nafty za 100 hodin. V případě úplného vyčerpání nafty je potřeba nejen odtah, ale často také odzdušnění celé palivové soustavy, což je časově náročný a finančně nákladný servisní úkon. Naopak značnou výhodou ICE vozidel využívajících tekuté palivo je možnost dodání potřebného paliva v kanystrech integrovanými záchrannými složkami. Některá BEV nabízí možnost dobíjet jiné EV. Při větším rozšíření elektromobility by toto řešení mohlo pomoci v krizových situacích.

Pokud uživatel BEV nebo ICE vozidla podcení nízký stav akumulátoru nebo nádrže a uvízne v zácpě s dojezdem například 200 km, velmi pravděpodobně jako první dojde energie k topení i pohybu ICE vozidlu. To díky faktu, že BEV s modelovou spotřebou 20 kWh/100 km a topným výkonem 0,65 kW/h má lepší poměr průměrné spotřeby vůči topnému výkonu než dieselový vůz s dálničním průměrem 7 l/100 km a spotřebou 0,6 l/h. V obou případech je nutno předvídat a při nepříznivém počasí se předzásobit energií nebo pohonnými hmotami.

### 3.5 Ekologická stránka BEV

Evropa se na produkci člověkem vypouštěných skleníkových plynů (GHG) podílí celosvětově 9 % (Boden et al., 2017), z toho přibližně 23,8 % (EEA, 2020) emisí GHG způsobuje sektor dopravy a z toho 71,7 % produkuje silniční doprava (EEA, 2020). Evropská silniční doprava jako celek se podílí na celosvětově člověkem produkováných emisích GHG přibližně 1,5 %. Minimalizace tohoto vlivu nahrazením všech vozidel se spalovacím motorem (ICE) vozidly

elektrickými by tedy měla zanedbatelný vliv na celosvětovou produkci GHG. Zejména pokud by se zároveň s výrobou BEV zvýšila poptávka po elektrické energii, vyráběné ze značné části elektrárnami s vysokou produkcí GHG. Navíc toto nahrazení není zcela reálné, protože jsou sektory transportu, které zatím nemohou využívat BEV (Melliger et al., 2018).

Na druhou stranu v ulicích velkých měst největším znečištěním nejsou globální emise GHG, ale lokální emise prachových částic, těžkých kovů a ostatních produktů výfukových zplodin ICE vozidel. Kromě používání městské hromadné dopravy, jízdních kol a pěší chůze lze tento problém řešit používáním BEV či HEV pro osobní a nákladní přepravu.

Ekologičnost BEV je často zpochybňována. A to vlivem použití velkých trakčních akumulátorů složených z článků obsahujících vzácné kovy. Dále se nabízí otázka, jak je elektromobil ekologický, když dobíjí akumulátor z elektrické energie vyrobené neekologicky. V následujícím textu bude nastíněn současný stav, a to od těžby materiálů pro výrobu akumulátorů, přes životnost, znovupoužití až po ekologickou likvidaci sekundárních článků v trakčních akumulátorech BEV. Na konci kapitoly je uvedeno několik výpočtů řešících praktickou ekologickou náročnost přepočtem na GHG.

### 3.5.1 Těžba surovin pro výrobu trakčních akumulátorů

Dle dokumentu (Dunn et al., 2012), který se snažil vyjádřit ekologickou náročnost výroby a recyklace akumulátorů, lze definovat podíl jednotlivých složek akumulátoru před rokem 2012. Tehdy tato studie predikovala skutečnost, že se budou v oblasti EV používat lithium-iontové články na chemické bázi NMC (Nikl-Hořčík-Kobalt). Díky BatPaC modelu pro baterie a sadě výpočtů a měření pak byla vypočtena hmotnost a podíly komponent na hmotnosti trakčních akumulátorů pro BEV, HEV a PHEV viz tabulka 3.7.

Až na BEV značky Tesla měl podle informací tohoto článku (Johnson, 2020-09-24) pravdu. Složení lithium-iontových článků Tesly je NCA (Nikl-Kobalt-Hliník). Tesla používala nejprve cylindrické články formátu 1865(0). Posléze zvýšila energetickou hustotu a výkonové parametry díky odlišnému formátu nových článků 2170 a na konferenci Battery Day 2020 představila nové články ve formátu 4680. Ty mají nejen vyšší energetickou hustotu, ale také minimalizují výkonové ztráty, a tím tepelné namáhání. Výsledkem těchto vylepšení je vyšší dojezd a rychlejší dobíjení.

Většina článků obsahuje výrazný podíl kobaltu. Ten zvyšuje cenu akumulátoru a tím i cenu EV. Navíc je těžen zejména v Konžské demokratické republice, a to za nevyhovujících podmínek. Většina výrobců článků pro mobilní zařízení a také pro elektromobily se připojila do aliance za férové získávání kobaltu (Ltd, 2018). Tendence všech výrobců článků je zredukovat nebo zcela eliminovat přítomnost kobaltu. Na konferenci Battery Day byly rovněž prezentovány články, které kobalt v katodách nepoužívají vůbec. Jejich složení je buď čistě lithium-niklové pro maximální energetickou hustotu nebo lithium-nikl-hořčíkové pro o něco

nižší energetickou hustotu, při současném výrazném snížení ceny. Poslední možností pro stacionární aplikace a levné elektromobily jsou katody založené na bázi železa. Zároveň se místo grafitu pro anodu začíná používat křemík – druhý nejzastoupenější prvek na zemi.

Tabulka 3.7: Podíl prvků a hmotnosti v akumulátorech pro EV.

Komponent	Procenta hmotnosti		
	HEV (%)	PHEV (%)	BEV (%)
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	27	28	33
Grafit/uhlík	12	12	15
Tmel	2,1	2,1	2,5
Měď	13	15	11
Kovaný hliník	24	23	19
LiPF <sub>6</sub>	1,5	1,7	1,8
Ethylenkarbonát	4,4	4,9	5,3
Dimethylkarbonát	4,4	4,9	5,3
PP	2,0	2,2	1,7
PE	0,26	0,40	0,29
PET	2,2	1,7	1,2
Ocel	2,8	1,9	1,4
Tepelná izolace	0,43	0,33	0,34
Glykol	2,3	1,3	1,0
Elektronika	1,5	0,9	1,1
Hmotnost akumulátoru (kg)	19	89	210

Dalším prvkem v článcích je lithium. Používá se ve slitinách lehkých a odolných konstrukcí letadel, družic a podobně. Využívá se také ve farmacii, jaderné energetice a chemii. Nejširším využitím je výroba sekundárních elektro-chemických článků. Lithium dle (Desjardins, 2016-10-26) dominuje trhu se sekundárními články a zcela vytlačilo články na bázi niklu (NiMH, Ni-Cd).

Dle (MCS, 2021) jsou v roce 2020 nalezené světové zásoby lithia odhadovány na 86 milionů tun, v roce 2018 byly stejným zdrojem odhadnuty na 62 mil. v roce 2016 na 34 mil. Rešeršní článek (Gruber et al., 2011) zpracoval studii založenou na datech z velkých nalezišť lithia a došel k názoru, že plná elektrizace všech vozidel na celém světě zásoby 39 Mt lithia nevyčerpá. Dle jeho odhadů, počítaje s 90% výtěžností z recyklace starých akumulátorů, bude celková poptávka na obměnu světového vozového parku do roku 2100 celkem 20 Mt. Většina zásob lithia se vyskytuje v podobě solí na povrchu vyschlých solných jezer a těžba nijak zvlášť nenarušuje přírodu. Značné množství lithia lze dále extrahovat z mořské vody. Dle (Kushnir, 2015) a (Martin, 2017) na jednu kWh akumulátoru spotřebujeme 160 g lithia. Z toho vyplývá, že ze současně známých zásob můžeme dostupnou technologií vytvořit 537,5 miliard kWh

akumulátorů, což při 50 kWh/BEV vychází na 10,75 miliard vozidel. Dle (www.statista.com, 2016) bylo v roce 2015 na světě 1,28 mld vozidel, takže současný vozový park lze se zásobou lithia obměnit téměř 8,5 krát.

Ostatní prvky v článku nejsou nikterak vzácnými až na výjimku v elektronice, kde se používá zlato, stříbro a další vzácné prvky ve stopovém množství. Paradoxně díky složitosti současných ICE, nutnosti měření a řízení stovek veličin, je více elektroniky v nich než v BEV. Rovněž lze v hybridních a ICE vozidlech nalézt více hliníku, jehož výroba je energeticky velmi náročná, ale i mědi, plastů či vzácných prvků pro katalyzátory, teplotně odolné součásti turbodmychadel a jiné.

V současně nastoleném trendu, kdy neekologická a nehumánně nastavená těžba kobaltu přestává být potřebná a výrobci hledají nová ložiska a efektivní způsoby těžby lithia, se výroba trakčních akumulátorů stává tak ekologickou, jak ekologický je energetický mix spotřebované elektrické energie.

### 3.5.2 Výroba trakčních akumulátorů

Výroba trakčních akumulátorů je každý rok efektivnější. Dřívější studie (Kim et al., 2016-07-19) ve spolupráci s automobilkou Ford odhadla potřebu 140 kgCO<sub>2</sub>e<sup>3</sup> k vyprodukování jedné kWh trakčního akumulátoru. Studie (Romare et al., 2017) švédského institutu pro životní prostředí udávala rozsah 48–216 kgCO<sub>2</sub>e/kWh naopak čínské studie beroucí v potaz čínský energetický mix nabízí rozsahy 37–58 kg/kWh (Hao et al., 2017) a 105–111 kg/kWh (Yin et al., 2019). Autor rešeršního článku (Hoekstra, 2019) vzal v potaz, mimo jiné, data výše zmíněné studie a stanovil průměrnou hodnotu na 65 kgCO<sub>2</sub>e/kWh.

### 3.5.3 Životnost trakčních akumulátorů

Otázka životnosti trakčního akumulátoru byla obsáhle zpracována v kapitole 3.3. Kromě praktických dat se nabízí výsledky vědeckých studií. Například (Bugga et al., 2010) v roce 2010 zkoumal data 9 let uskladněných lithium-iontových článků. Jeho závěrem je, že vyšší teplota snižuje kapacitu lithium-iontových článků bez ohledu na cyklickou životnost nebo proudové zatěžování. Autor článku (Few et al., 2018) dokumentuje nárůst počtu cyklů (do poklesu kapacity pod 80 %) na 5 000–10 000 do roku 2030. Autor (Domi et al., 2019-01-23) slibuje zvýšení počtu cyklů díky užití křemíkové elektrody. Použití křemíkové elektrody rovněž oznámila Tesla, která se ve spojitosti s nedávnými úspěchy na poli elektrochemie sekundárních článků snaží o „Milion miles battery“, tedy trakční akumulátor, který by v BEV sloužil 1 000 000 mil (1 609 344 km).

---

<sup>3</sup>V případech, kdy práce popisuje CO<sub>2</sub>e, používá celosvětově uznávaný přepočítání vlivu skleníkových plynů na množství CO<sub>2</sub>. Tedy všechny skleníkové plyny uvolněné například při výrobě akumulátoru se přepočítají podle svého vlivu na ekvivalentní množství CO<sub>2</sub>.

### 3.5.4 Druhotné využití trakčních akumulátorů

Trakční akumulátory po dosažení hranice 80 % SoH, která je uváděna jako milník cyklické životnosti, nejsou určeny k likvidaci. Trakční akumulátory a jejich kapacita fungují tak dlouho, dokud dojezd BEV stačí k bezstarostnému provozu. Pokud tedy vozidlo s původním dojezdem 400 km je provozováno s maximálním denním nájezdem 200 km a přes noc dobíto, může sloužit až do 50 % SoH. Naopak pokud někdo potřebuje denně najezdit s tímž vozidlem 350 km, bude pro něj BEV na hraně životnosti při 87,5 % SoH, což je objektivně považováno za dobrý stav SoH akumulátoru.

V posledních letech se objevují projekty znovuvyužívající trakční akumulátory prvních generací BEV. Například na stadionu v Amsterdamu (*Energy storage system in Amsterdam ArenA now live!*, 2018) je používáno 148 kompletních trakčních akumulátorů z první generace Nissanu Leaf jako úložiště s možností uložení až 2,8 MWh elektrické energie a možností poskytovat výkon až 3 MW. Systém doplňuje 4200 solárních panelů.

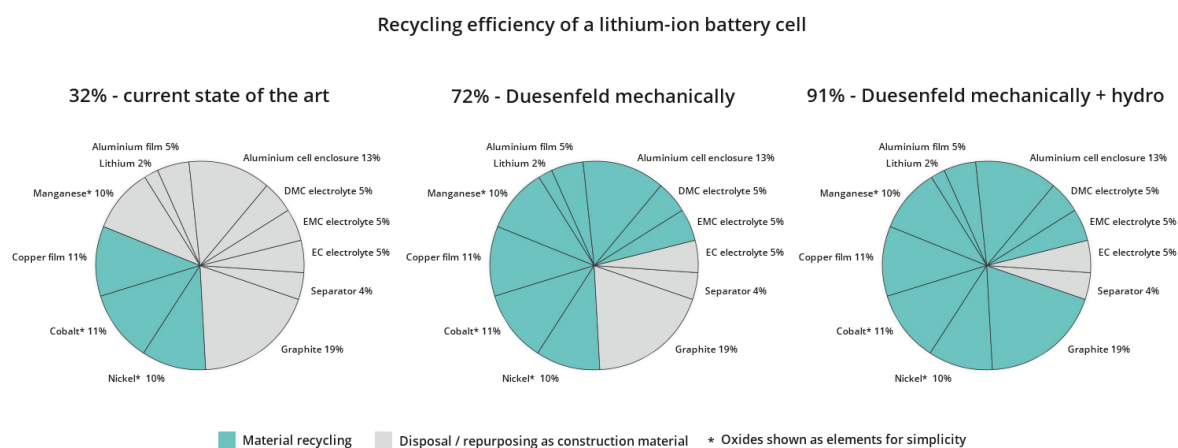
Zajímavostí je, že celková uložená energie, vztažená ku počtu akumulátorů, naznačuje, že průměrná uložená energie v jednom původně 24 kWh trakčním akumulátoru dosahuje přibližně 18,92 kWh, což je 78,83 % SoH. Výrobci tedy pravděpodobně tyto akumulátory získali při výměně 24 kWh za 30 kWh akumulátor nebo při oprávněné reklamaci na stav SoH.

Dalším projektem je VW E-Auto Powerbank (VW, 2019), který využívá akumulátory ze starších BEV koncernu VW a poskytuje prostor pro uložení až 360 kWh elektrické energie a k následnému dobíjení až 4 vozidel maximálním výkonem 100 kW. Tento systém se bude dobíjet ze sítě a bude vyžadovat pouze 30 kW přípojku, kterou navíc nemusí využívat pouze on. Slibuje také možnost doplňování energie pouze v době přebytků z ekologických zdrojů, a tak skutečně nízké emise. Celý projekt je řešením pro podporu elektromobility a stabilizace sítě v místě, kde není pro dobíjecí stanice bez akumulace dostatečný příkon.

### 3.5.5 Recyklace trakčních akumulátorů

Recyklace trakčních akumulátorů BEV není aktuálním problémem z hlediska stádia životního cyklu, ve kterém se nachází téměř všechny lithium-iontové články z elektromobilů. Lithium se pro výrobu trakčních akumulátorů začalo používat ve velkém měřítku teprve před deseti lety, proto většina akumulátorů ještě slouží v BEV, nebo se používají ve stacionárních aplikacích jako bylo popsáno výše. Výrobci BEV však především z ekonomických zájmů hledají optimální cestu, jak z recyklovaných článků vytěžit maximum cenných surovin, zkrátit dodavatelské řetězce a snížit tak náklady na jejich těžbu v přírodě. Vedlejším efektem těchto ekonomických zájmů je jednoznačně ekologický dopad. Publikace (Elwert et al., 2018; Burkert, 2018) naznačují pokrok, k jakému došlo během několika let. Zatímco v publikaci (Burkert, 2018) je současný zmapovaný stav popsán jako 27% využití materiálů z článků v roce 2018 a naznačuje možnost extrakce 56 až 75 % surovin, pro rok 2020 predikuje extrakci až 96 %

cenných surovin z každého článku. Tento stav je převzat z (Duensefeld, 2021), recyklační linky na lithium-iontové akumulátory, která dosahuje v tuto chvíli 72% návratnosti surovin, viz obrázek 3.7. Dle zdroje (Harper et al., 2019) je recyklace důležitá nejen z ekologických a ekonomických důvodů, ale také pro zkrácení dodavatelského řetězce. Recyklační linka může snížit a v ideálním případě dokonce eliminovat potřebu dovozu vzácných materiálů nutných pro výrobu nových akumulátorů.



Obrázek 3.7: Současný stav recyklace lithium-iontových článků z trakčních akumulátorů BEV. Převzato z materiálů firmy Duensefeld (Duensefeld, 2021).

Teprve na počátku roku 2021 byla uvedena do provozu dlouho stavěná recyklační linka firmy VW (Kane, 2021), která slibuje výtěžnost 70 % a v dlouhodobém horizontu až 90 %. Rovněž Tesla začala s pilotní recyklací některých článků a dle (Humbert, 2020) tak činí se 70% účinností. Dlouhodobý cíl stanovený Elonem Muskem je recyklace 100 % vložených surovin.

Recyklace řeší nejen zlepšení ekonomické bilance BEV, ale zejména citlivě nakládá s cennými kovy, a tím šetří jak zásoby kovů, tak i důsledky z jejich těžby a zpracování.

### 3.5.6 Srovnání provozu ICE vozidla a BEV

Vzhledem k tomu, že se jen málo vozidel vyrábí zároveň v ICE a plně elektrické variantě a zároveň je zmapována ekologická náročnost výroby, byla jako opora zvolena starší studie (Kim et al., 2016-07-19). Autoři ve spolupráci s automobilkou Ford vypočetli náročnost těžby a výroby trakčního akumulátoru pro BEV variantu Fordu Focus. Na základě těchto dat a také dat o výrobě ICE varianty stejného vozu pak lze vyčíslit ekologickou zátěž skleníkových plynů, které musí BEV splatit svým provozem. Samotní autoři (Kim et al., 2016-07-19) přiznávají, že rozptýl zatížení výroby akumulátoru skleníkovými plyny se liší napříč studiemi, nicméně sami stanovili na základě poznatků a dle dat spolupracující automobilky hodnotu ekologické náročnosti na 140 kgCO<sub>2e</sub>/kWh.



Z jejich odhadu bylo stanoveno 1,9t vytvořeného CO<sub>2</sub>e při těžbě materiálů a 1,5t při výrobě článků a kompletaci do akumulátoru. Z celkových 3,4t zbude 2,8t po odečtení komponent, které nejsou pro BEV potřeba, ale jsou přítomny v ICE variantě.

Dle (EV-Database, 2015) je NEDC spotřeba vozidla 12,1 kWh/100km, reálná spotřeba metrikou EVDB byla vyčíslena na dodaných 18,7 kWh/100km, tedy včetně započtení účinnosti palubní dobíječky. Dalším negativním faktorem jsou ztráty v elektrické síti. Dle informací z (*Electric power transmission and distribution losses (% of output) – Czech Republic | data*, 2016) byl v roce 2016 dlouhodobý průměr ztrát v síti cca 5%. Dle zprávy firmy ČEZ (ČEZ, 2020b) byly ztráty v roce 2019 ve výši 4,73%. K dodání 18,7 kWh je tedy potřeba vyrobit v elektrárně 19,63 kWh elektrické energie. V roce 2020 byla emisní zátěž českého energetického mixu elektrické energie průměrně 330 gCO<sub>2</sub>e/kWh (ČEZ, 2020c). Z těchto dat lze vypočítat nepřímé emise 64,78 gCO<sub>2</sub>e na km.

Spotřeba Ford Fusion 1.0 ekoboost je dle testů 4l/100km, dle reálných dat uživatelů (*Gasoline consumption*, 2021) se tento motor pohybuje se spotřebou okolo 6,58l/100km a s touto spotřebou má přímé emise 163 gCO<sub>2</sub>e /100 km.

Velkým problémem ekologie celého dopravního řetězce těžby, čištění, rafinace ropy a následné expedice ropných produktů je nejasná energetická náročnost. Už jen těžba ropy je energeticky náročná, její čištění od kalů a písků a doprava jsou dalšími energeticky a tím ekologicky náročnými kroky. Pro většinu světa je ropa dovážena tankery. Ty samy o sobě díky absenci regulací emisí na moři spalují nejtěžší frakce ropy a tím vypouštějí enormní množství skleníkových a zdraví škodlivých plynů. Pro ČR se většina ropy dováží z Ruska ropovodem Družba. Tento ropovod spotřebovává nemalé množství elektrické energie na dopravu ropy. Například (Greene et al., 2020) tvrdí, že pro střední Evropu jde o 7,281 gCO<sub>2</sub>e/l ropy. Dalším krokem je rafinace, která je rovněž energeticky velmi náročná. Ekologii provozu rafinerii zhoršuje vypouštění rafinerského plynu do ovzduší více než spotřebovaná energie. V ČR se rafinerský plyn využívá v uzavřeném okruhu ke zvýšení celkové účinnosti rafinerie. Další transport do čerpacích stanic pomocí cisteren přidává další nepřímé emise CO<sub>2</sub>e. Samotné čerpání paliva do vozidel spotřebovává nemalé množství energie stejně jako osvětlení a samotný provoz čerpacích stanic. Všechny tyto aspekty byly vzaty v úvahu v JEC zprávách (Joint Research Centre, 2020), které plánují budoucí náročnost všech energií a jsou podkladem pro rozhodování o dalším směřování Evropy. Tyto zprávy zahrnují i výsledky pro nepřímé emise procesu od vrtu do nádrže (well-to-tank), a to po přepočtu 2,63 gCO<sub>2</sub>e/l pro naftu a 2,81 gCO<sub>2</sub>e/l pro benzín. I když ostatní zejména vědecké publikace naznačují spotřeby řádově vyšší, jde o nejpropracovanější, nejnovější a nejkomplexnější publikaci. Z JEC zpráv čerpá i mnoho odborných publikací například (Moro et al., 2018). Tato publikace porovnála ekologii BEV v různých členských státech v závislosti na emisích GHG z energetického mixu. Optikou dnešních informací je slabina studie zejména porovnávání zaokrouhlených odhadovaných spotřeb u BEV. Rovněž téměř ve všech členských státech se stav emisí GHG z výroby elektřiny zlep-

šuje. Nejzrůsáhlejší studií ze strany ekologie je (Bauer et al., 2015), která porovnává minulost, i předpokládanou budoucnost všech typů pohonů od ICE vozidel, přes BEV, až po vodíková vozidla (FCEV).

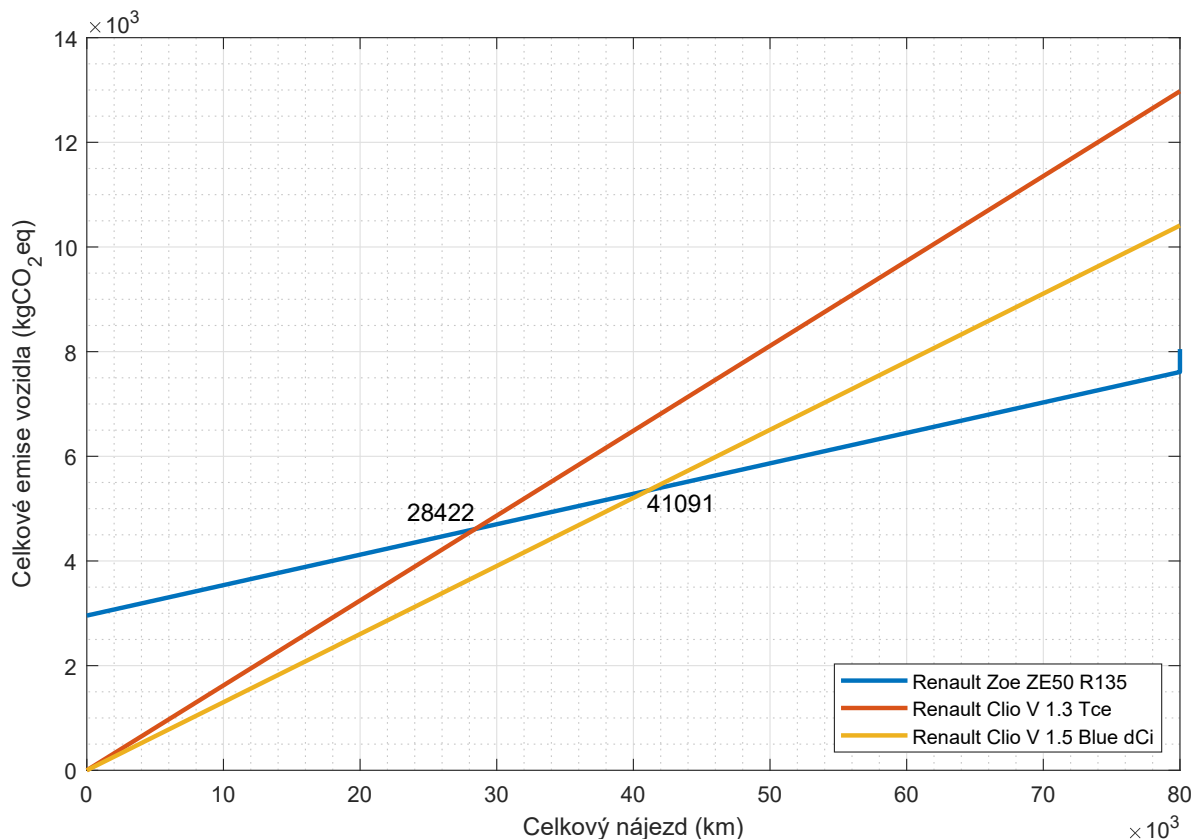
Při spotřebě 6,58l/100km budou tedy nepřímé emise dalších 0,18 gCO<sub>2e</sub>/km. Přímé a nepřímé emise dohromady jsou v tomto případě rovny 163,18 gCO<sub>2e</sub>/km. Pakliže známe nepřímé emise BEV a celkové emise ICE vozidla, můžeme vypočítat rozdíl. Ten je 98,40 gCO<sub>2e</sub>/km. Pro vyrovnání dluhu 2,8 tCO<sub>2e</sub> z výroby je tedy třeba ujet necelých 28 456 km.

Pro druhé, vlastní srovnání může sloužit například Renault Zoe ZE50 R135, rok výroby 2020 a Renault Clio V 1.3 Tce (130 Hp) EDC, rok výroby 2020, Renault Clio V 1.5 Blue dCi (115 Hp). Všechna vozidla mají podobný výkon a rozměry. Podrobná data jsou v tabulce 3.8. Do výpočtu spotřeby se započítávají 4,73% ztráty v síti dle (ČEZ, 2020b). Vzhledem k absenci dat o ekologické zátěži při výrobě všech vozů bylo přihlédnuto k (Kim et al., 2016-07-19) a k novým datům o produkci GHG/kWh z (Hoekstra, 2019), kde byla stanovena průměrná hodnota na 65 kgCO<sub>2e</sub>/kWh. Ekologický dluh byl vypočten na 3 556 kgCO<sub>2e</sub>. Ten byl dále ponížěn o stejnou hodnotu jako v minulé studii, tedy o absenci součástí pro ICE vozidla.

Tabulka 3.8: Údaje o emisích srovnávaných vozidel. Data převzata z (EV-Database, 2021; Auto-data, 2021a; Auto-data, 2021b; spritmonitor.de, 2021; Spritmonitor.de, 2021; Joint Research Centre, 2020).

Model vozidla Renault	Zoe ZE50 R135	Clio V 1.3 Tce	Clio V 1.5 Blue dCi
Palivo	Elektrická energie	Benzín	Nafta
Výkon (HP)	134	130	115
Spotřeba WLTP (mj/100 km)	13,5	5,7	4,2
Reálná spotřeba (mj/100 km)	16,8	6,97	4,91
Emise akumulátoru (kgCO <sub>2e</sub> )	3556		
Redukce jednoduchosti BEV	600		
Rozdíl emisí z výroby (kgCO <sub>2e</sub> )	2956		
Přímé emise (gCO <sub>2e</sub> /km)	0	162	130
Nepřímé emise (gCO <sub>2e</sub> /km)	58,2	0,2	0,13
Emise celkem (gCO <sub>2e</sub> /km)	58,2	162,2	130,13

Výsledky vývoje emisí v závislosti na celkovém nájezdu vozidla jsou zobrazeny v grafu 3.8. Zoe začne být z hlediska celkových emisí ekologičtější než Clio V 1,3 Tce po 28 422 km. V porovnání s Clio V 1.5 Blue dCi dosáhne lepších hodnot po 41 092 km.



Obrázek 3.8: Průběh celkových emisí z výroby a provozu srovnávaných vozů v závislosti na nájezdu.

### 3.6 Nedostatek energie a nedostatečná síť

V textu nebyly zmíněny teoretické problémy, na které je často poukazováno odpůrci elektromobility. Například obava, zda česká distribuční síť snese nahrazení vozového parku za elektromobilitu, nebo zda budeme mít dost energie na provozování elektromobilů.

Obojí lze vyvrátit jednoduchou úvahou. Za rok 2020 dle dat ČSÚ (*Energetická bilance ČR – časové řady*, 2020) spotřebovaly rafinérie 1,27 PJ, což je rovno 352,78 GWh elektrické energie. Při průměrném českém nájezdu 10 700 km/rok a pesimistickém odhadu spotřeby průměrného elektromobilu 20 kWh/100km potřebujeme na rok provozu 2 140 kWh elektrické energie. To znamená, že z celkového příkonu rafinérií lze dobít téměř 164 849 elektromobilů. Pravdou je, že rafinérské produkty jsou potřeba k druhovýrobě spousty výrobků, a tedy veškerou výrobu zastavit nelze. Počet rafinérií by se přechodem na čistou mobilitu mohl snížit, což by vedle ušetřeného příkonu snížilo také emise, které rafinérie produkují.

Dalším zdrojem energie může být omezení jejího vývozu. V roce 2020, dle dat ERU ČR (*ERÚ – Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství*

v České republice za rok 2020, 2020), vyvezla celkem 13,06 TWh elektrické energie. To je dostatečné množství k dobíjení dalších 6 102 803 elektromobilů za stejných podmínek jako výše. Počet všech osobních vozidel v ČR byl 5 924 995 na konci roku 2019. Čistě dle statistických dat lze pouze z exportu elektrické energie živit celou republiku jezdící výhradně elektromobily. Podobné výpočty uvedli i (Stehlík, 2018-01-23) (Šurkala, 2016).

Stran obav o rozvodnou síť jsou obavy liché, a to jak teorií, tak dle vyjádření odborníků. Teoreticky z dříve uvedených výpočtů víme, že pro pokrytí denního nájezdu je potřeba 5,8 kWh, což se za noc, kdy je elektrické energie přebytek, dá vyjádřit jako 725 W po dobu 8 hodin nízkého tarifu. Tento výkon je polovičním výkonem průměrného vysavače nebo třetinovým výkonem rychlovarné konvice nebo mikrovlnné trouby. Pokud tedy rozvodná síť zvládá zapnutý PC, bude s velkou pravděpodobností zvládat i pomalé dobíjení elektromobilu.

Energetici tvrdí (Procházka, 2018), že díky dobíjení elektromobilů v nočních hodinách a spotřebě přebytků ze sítě naopak elektromobily pomáhají stabilizovat síť, a také, že ČR bez problému zvládne dobíjet BEV bez zásahů do infrastruktury ve statisících až milionu kusů vozidel. To by byla cca osmina všech vozidel registrovaných v ČR včetně traktorů, nákladních aut, autobusů a motorek.

### 3.7 Vyhodnocení překážek elektromobility

Po prozkoumání možností elektromobility bylo zjištěno, že většina obav je generována z nevědomosti novinářů, strachu z nové technologie, ojedinělých nehod a nedostatku nadhledu.

Elektromobily opravdu mohou způsobit enormní zatížení sítě, ale k takovému problému by byla potřeba většina světové produkce elektromobilů. V ČR bylo za rok 2020 registrováno 185 058 vozidel (SDA, 2021). Pokud bychom byli tak úspěšní jako Norsko a registrovali bychom polovinu z tohoto počtu BEV, počet by byl 99 931 ks bateriových elektromobilů ročně. Toto by dle vyjádření (Procházka, 2018) významněji nenarušilo stabilitu rozvodné sítě na deset let. Zároveň by energie potřebná k provozu těchto BEV nechyběla, protože by se její domácí spotřeba podepsala pouze na snížení vývozu elektrické energie o 1,5 % ročně (*ERÚ – Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství v České republice za rok 2020*, 2020).

Výroba elektromobilů je poměrně zatěžující pro životní prostředí, ale díky pokroku ve vývoji chemických článků a zkracování distributorských řetězců se energetická a současně i ekologická náročnost snižuje. To, a ekologizace výroby elektrické energie přispívá k rychlejší „návrtnosti ekologického dluhu“ elektrických vozidel a následně jejich ekologičtějšímu provozu. Tato návratnost se pohybuje od jednotek tisíc kilometrů až po mnoho desítek tisíc km dle energetického mixu země, ve které je BEV provozováno. Důležitý je poznatek, že i za předpokladu nejneekologičtějších energetik v EU je samotný provoz BEV stále ekologičtější než provoz ICE vozidla. S narůstajícím tlakem na cílové emise nově vyrobených vozů narůstá

snaha výrobců ICE vozidel snížit tento parametr. Díky těmto opatřením jako je „downsizing“, podbíjení palubních akumulátorů, ale i AD Blue, sice úspěšně snižují emise, ale zkracují životnost komponent vozu jako jsou motory či akumulátory. Vzhledem k možnostem znovupoužití akumulátorů BEV není recyklace problémem, který by bylo aktuálně potřeba řešit. Dle výrobců existují reálné možnosti, jak recyklovat přes 95 % vzácných prvků z článků, a tím ještě snížit ekologickou náročnost budoucích akumulátorů. V posledních letech kromě vědeckých studií vzniká i řada online kalkulaček k výpočtu „návrtnosti ekologického dluhu“. Například Clinmobil (Gibon et al., 2020) je založen na vědeckých studiích a poskytuje možnost nastavení široké škály parametrů.

Diskutována byla také bezpečnost BEV, a dle všech teoretických předpokladů i statistických ukazatelů jsou BEV bezpečnější než ICE vozidla. Ať už se jedná o aktivní či pasivní bezpečnost, statistiky požárů nebo komfort ve statických kolonách, tak při pravidelné údržbě a dodržování doporučení výrobce není důvod, proč by BEV mělo být považováno za méně bezpečné.

Podobně jako u ekologického aspektu, tak i ekonomická stránka BEV vyžaduje spíše dlouhodobý pohled na vůz. Nová BEV jsou dražší než srovnatelné vozy s ICE pohonem, nicméně díky levnějšímu provozu je možné při správné volbě vozu ušetřit nemálo peněz za dobu životnosti vozidla. Námitky na životnost akumulátorů a jeho cenu jsou založeny na zkušenosti z prvních generací vozidel a vzhledem k pokroku ve vývoji těchto technologií za poslední desetiletí jsou irelevantní. V budoucnu bude dle současné strategie EU, která je přejímána členskými státy a dalšími samosprávnými jednotkami, zakázán vjezd vozidel do center měst jinými než ekologickými vozidly. Tento trend se v současné době projevuje i v ČR jako pobídka pro majitele ekologických vozů v podobně levného rezidenčního parkování například v Praze, nebo parkování zdarma například v Ostravě. Naopak ostatní pobídky, jako je osvobození ekologických vozidel od dálničních poplatků v ČR nebo dotace na nákup elektromobilů jinde ve světě, se zdají být krátkodobými a nekoncepčními.

Dobíjecí infrastruktura je jedním z nejpálčivějších problémů současného rozvoje, nicméně vzhledem ke specifikům ČR je významná spíše otázka pomalého dobíjení přes noc na sídlišťích než tranzitní rychlodobíjecí stanice. Dle srovnání s Norskem, které je dlouhodobě v čele elektrifikace svého vozového parku, jsme na tom stran dobíjecí infrastruktury ku poměru k registrovaným vozidlům do zásuvky daleko lépe. Prozatím je však potřeba s menšími vozidly trasu plánovat. Nejdůležitější pro masovou elektrifikaci je zjištění, že 85 % dobíjení elektromobilů se děje doma a několik dalších procent v práci. Právě zaměstnanecké benefity v podobě firemních dobíječek společně s dobíjecími stanicemi na veřejných místech nejsou špatným plánem pro nenásilný rozvoj elektromobility.

Největším problémem bateriové elektromobility z pohledu uživatelů ICE vozidel je dojezd. Ačkoliv průměrný nájezd vozidla v ČR je 29 km denně, a dokonce ani firemní vozidla neujezdou více než 100 km denně, řidiči vyžadují mnohonásobný dojezd. Možná jde o zvyk z ICE vozidel,

která mají dvojnásobný dojezd, možná jde o těch několik jízd ročně, které by vyžadovaly rychlodobíjení. Jednoduchým řešením dojezdu je zvýšení kapacity akumulátoru či snížení spotřeby. Snižování spotřeby má negativní vliv na bezpečnost, pohodlí a design BEV, zatím co zvyšování kapacity akumulátoru navyšuje cenu, ekologickou zátěž a tedy konkurenceschopnost BEV. Obě optimalizace na nejdelší dojezd mají své technologické limity, kterým se výrobci při současných technologiích blíží. Největším negativem jsou jednoznačně nepřesné odhady dojezdu ve vozidlech. Na internetu kolují videa, kde lidé negativně hodnotí dojezd BEV na začátku trasy a následně dojezd na konci společně s chybou zobrazovaného dojezdu. Ta může dosáhnout i desítek procent. Pochopitelně v extrémních situacích může tato chyba zapříčinit i vybití vozidla na trase a nutnost odtahu. Řidič takového vozidla si pak o elektromobilitě bude právem myslet jen to nejhorší. Na internetu je několik stránek s databází elektrických vozidel a jejich reálnými spotřebami. Bohužel třeba i nejznámější z nich (EV-databaze, 2021b) je zatížena chybou. Její dálniční spotřeba je počítána pro dálnice s maximální rychlostí 120 km/h. V ČR je maximální povolená rychlost 130 a uvažováno je její zvýšení na 140 km/h, jako tomu je například v sousedním Polsku. Vzhledem k přibližně kvadratické závislosti potřebné síly na rychlosti se pak tyto dálniční spotřeby značně liší. Existují BEV, která jsou schopna z dat flotily své značky nebo z dopravních informací a mapových podkladů spočítat spotřebu, a tedy dojezd, poměrně přesně. Bohužel tyto algoritmy nejsou přítomny ve všech BEV.

Tato práce se bude dále zabývat implementací poznatků z tohoto rozboru a snahou o vývoj algoritmu k určení přesného dojezdu a optimalizace toků energií. Tento algoritmus by měl při jeho nasazení do stávajících BEV pomocí mapových podkladů znalosti charakteristik vozidla, dopravních informací a předpovědi počasí s minimální chybou určit aktuální dojezd vozidla. Tato data jsou vstupem pro optimalizační procesy jako je optimalizace času na cestě, optimalizace spotřebované energie, a tedy ceny nebo optimalizace na nejkratší cestu. V již probíhající cestě pak algoritmus cyklicky probíhá a případné odchylky může korigovat buď přeplánováním trasy nebo omezením spotřeby.

## Kapitola 4

# Současný stav řešení

V této kapitole je pro pochopení historického kontextu stručně shrnuta historie elektromobility. Cílem průzkumu je porozumění, proč k masovému rozšiřování elektromobility dochází až nyní, když dle většiny pramenů byl elektromobil již od počátku rovnocenným soupeřem benzínovým vozidlům. V další části kapitoly je provedena důkladná rešerše současného stavu poznání v oblasti výpočtu dojezdu BEV. V poslední části této kapitoly je popsán vlastní výzkum v podobě identifikace způsobu výpočtu dojezdu u dvou na trhu dostupných BEV.

### 4.1 Stručná historie elektromobility

Už na konci 18. století existovaly snahy o zabudování velkých parních motorů do osobních vozidel, lépe řečeno kočárů. Parní pohon se postupně prosazoval v osobní dopravě a až do nástupu spalovacích a elektrických protějšků mu byly konkurencí pouze koně.

V roce 1827 Štefan Anián Jedlík, slovensko-maďarský fyzik, sestrojil první stejnosměrný elektromotor se rtuťovým komutátorem a o rok později jej připevnil na vozík jako pohon. Tím vznikl první bateriový elektromobil. Ve stejné době pracoval Samuel Morey na svém revolučním benzínovém spalovacím motoru, který se však neujal. O několik let později se v Anglii a Spojených státech začala zkoušet elektrická trakce. V Anglii v roce 1842 dokázali jet s nenaloženým vlakem maximální rychlostí 6,5 km/h, a to vlivem vysoké hmotnosti primárních článků. V Americe primární články umístili podél trati a použili koleje jako vodiče. Tyto technologie nemohly cenově ani výkonnostně konkurovat parním vlakům, zejména kvůli elektromotorům s nízkou účinností a primárním článkům na jedno použití. V následujících dekádách se díky pokrokům v konstrukci elektromotoru, dynamu a chemických článků vývoj zrychloval. Zejména Plantého vynález dobíjecí olověné baterie umožnil dobíjení a tím znovupoužitelnost akumulátoru. Na počátku 90. let 19. století bylo napříč Evropou představeno několik elektrických kočárů či dokonce prvních automobilů. Ve Francii, Belgii, Německu, Anglii i Spojených státech byly vyráběny a testovány bateriové elektromobily. Mezi nejvý-

znamnější osobnosti patří Ferdinand Porsche, který nejen vyráběl bateriové elektromobily, ale podle většiny zdrojů je rovněž vynálezcem hybridního pohonu. Jeho sériový hybrid používal elektrický pohon k pohybu a benzínový agregát spojený s dynamem k výrobě elektrické energie. Tím Porsche odstranil největší nevýhody benzínového pohonu, tedy přítomnost spojky, převodovky a dalších v té době velmi poruchových komponent. V roce 1899 byla poprvé pokořena rychlostní hranice 100 km/h, právě bateriovým elektrickým vozidlem.

Zejména publikace (Mom, 2004-03-11) se zaměřila na využívání elektrických vozidel na přelomu století. Z jejich poznatků se celosvětově elektromobily používaly například pro taxislužby. Ty nepotřebovaly vysoký dojezd. Po vyčerpání energie v akumulátoru jej jednoduše vyměnily a vybitý akumulátor daly dobít. Elektromobily se dále začaly prosazovat jako nákladní automobily pro mlékaře, pivovary, poštovní nebo dokonce hasičská vozidla. Výjimkou nebyla ani elektrická ambulance nebo úklidové vozidlo. Ve všech těchto aplikacích byl nízký dojezd irelevantní, a díky vysoké spolehlivosti byla elektrickému pohonu dána přednost před benzínovým.

Největší oblíbenosti se těšila v USA elektromobilita v letech 1900–1910, kdy zaujala 38 % trhu, předehnána byla pouze parními vozidly se 40% podílem na trhu. Nejhůře na tom byla benzínová vozidla zabírající pouze 22% podíl. Jednalo se jak o vozidla taxi, tak o elektrická nákladní vozidla. V tomto čase také elektromobilita dosáhla dalších úspěchů. 13 elektromobilů Beardsleys v dojezdové soutěži najelo průměrně 163 km a vozidlo s nejlepším dojezdem ujelo přes 180 km na jedno nabití. V těchto úctyhodných výsledcích pomohly také moderní pneumatiky od firmy Goodyear speciálně upravené pro elektromobily. Rovněž se začaly masově používat tzv. Edisonovy (NiFe) články, které měly vyšší energetickou hustotu a také vyšší dobíjecí proud.

Podíl benzínových vozidel na trhu významně ovlivnil jednak nález nových ropných ložisek a s tím spojené zlevnění benzínu, ale zejména Henry Ford. Ten sice sám jezdil luxusním elektromobilem, ale jeho cílem bylo zlevnění ICE automobilů Ford T tak, aby si jej mohl dovolit každý. Implementací pásové výroby a normalizací součástí dosáhl základní ceny 650 USD v roce 1912 a 360 USD v roce 1916. V těch letech se cena elektromobilu pohybovala mezi 1750 a 3000 USD. Poslední překážku široké adaptace benzínových vozidel odstranil vynález elektrického startéru v roce 1912, který se začal používat i v levném Fordu T od roku 1919.

Z dostupných pramenů lze vydedukovat, že po první světové válce v roce 1918 elektromobilita ustoupila do elektrických dodávek, které například v Anglii úspěšně vytlačily z cest parní nákladní vozidla, elektrických autobusů, mlékařských dodávek a jiných aplikací, kde se jezdila krátká trasa a bylo dostatek času na dobití akumulátorů. V osobních vozidlech se objevovala jen minimálně. V USA postupně upadala i elektrická rozvážková služba, a to díky vynálezu a rozšíření lednic a mrazáků.

Ve Spojeném království v letech druhé světové války kvůli počátečním ztrátám koní a nedostatku benzínu vinou námořní blokády byly elektrické dodávky oblíbenější. Jejich cena a



náročnost výroby však omezovala počet produkovaných kusů. Porscheho návrhy na hybridní pohon tanku Tiger pro Třetí říši nebyly schváleny z důvodu náročnosti na vzácnou měď, jeho využití již vyrobených podvozků dalo vzniknout slavnému stíhači tanků – Ferdinand. Na druhé straně oceánu bylo potřeba mnoho levných a efektivních nákladních vozidel nejprve v rámci „Dohody o půjčce a pronájmu“ a následně po zapojení USA do války. Nejen nedostatek mědi, ale zejména cena vozu způsobila, že byla veškerá výroba přeorientována na ICE vozidla.

V poválečné obnově Evropy neměla elektrická vozidla místo. Často bez dobíjecí infrastruktury, příliš drahá a s nízkým dojezdem. Benzínové a nyní i naftové motory postrádaly neduhy svých předchůdců. Startovaly elektricky, byly spolehlivé, řazení a používání spojky bylo uživatelsky přívětivější. Válkou zdecimované Japonsko naopak vytvořilo BEV TAMA, které rychlostí 35 km/h dokázalo přepravit 4 osoby na vzdálenost cca 65 km. V USA se začali lidé obávat o své zdraví ve velkoměstech vlivem klesající kvality vzduchu. Začátkem 60. let začalo diskutovat o vlivu lidské činnosti na znečištění ovzduší. Vše vyvrcholilo až v polovině 70. let Zákonem o ovzduší. Vzhledem k vysokým nárokům amerických řidičů a stále stejné technologii akumulace energie však nebylo výsledkem nic konkrétního. Všichni čekali na „záračnou baterii“.

Významnou ranou závislosti celého světa na ropě byla Jomkipurská válka. Tedy napadení Izraele Egyptem a Sýrií a podporou Izraele za strany USA. Právě tato podpora vyústila v ropnou krizi. Na straně útočníků stála liga arabských států, která zároveň jako OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries – Organizace zemí vyvážejících ropu) produkovala 70 % světové ropy. Země OPEC vyvinuly nátlak nejprve omezením produkce ropy a následně uvalením embarga na vývoz ropy do zemí podporujících Izrael. V důsledku toho se cena ropy zvýšila až čtyřnásobně a svět utrpěl takzvaný „Ropný šok“. Výsledkem tohoto konfliktu byly světové úvahy o závislosti na ropě, úsporných opatřeních a zejména hledání alternativních pohonů. Cena ropy, která se ani po skončení Jomkipurské války nevrátila na předválečnou úroveň, změnila uvažování výrobců aut. Místo objemných motorů se začaly vyrábět úspornější vozidla. Nejprodávanějšími automobily té doby byla japonská vozidla s malým objemem motoru. Zároveň vznikla iniciativa k výrobě elektrických vozidel. Bohužel akumulace byla stále závislá na olověných akumulátorech, a tak dojezd, cena a hmotnost nevyhovovaly potřebám. Americký vynálezce Victor Wouk začal na podnět výše zmíněných změn vyvíjet elektromobily. I přes použití NiCD akumulátorů nebyl s výsledkem spokojen, a proto začal pracovat na hybridním pohonu. Vozidlo, vytvořené v roce 1974 bylo otestováno agenturou EPA. Výsledky byly skvělé, byla prokázána poloviční spotřeba a 9% emisí původního vozu. Bohužel tyto ani další paralelně vyvíjené hybridní vozy se do dalšího testování nedostaly. Dalším pozoruhodným a pro dnešní elektromobily důležitým člověkem je David Arthurs, který si v roce 1979 přestavěl Opel GT na sériový hybrid. Tato koncepce hybridního pohonu byla zmiňována již dříve u Porscheho vozidel, ale David Arthurs jako jeden z prvních použil v elektromobilu rekuperaci, tedy přeměnu kinetické energie na elektrickou, a ukládání

energie do akumulátoru.

Jeden z prvních paralelních hybridů Audi Duo si moc dobře nevedl. Elektrický agregát poháněl zadní kola a přední nápravu poháněl 2,3l spalovací motor. Řidič si mohl zvolit jaký typ pohonu chce použít. Vozidlo mělo vysokou hmotnost a tím i spotřebu.

V roce 1992 se Japonsko zavázalo vyvíjet vozila s co nejnižšími emisemi. Již v roce 1997 začalo prodávat HEV Toyota Prius – dodnes nejúspěšnější hybrid, který se stále vyrábí. Do roku 2020 se jej prodalo přes 1,6 milionu kusů po celém světě. Nejúspěšnější pokusy o elektromobily v západní Evropě měly francouzské značky Peugeot a na východní straně bývalé železné opony Sověti i Češi. Například elektrická Škoda Favorit Eltra se dodnes těší velkému zájmu sběratelů. V USA v roce 1992 administrativa Billa Clintona začala opět podporovat vývoj nových elektromobilů. Největší úspěch měl koncern General motors, ten přišel s projektem EV1. V rámci tohoto vývoje vznikl nový vůz, který byl pronajímán uživatelům. Zatímco první generace s olovenými akumulátory měla dojezd 130–160 km, druhá od roku 1999 zvládla na jedno dobití ujet až 230 km. Dosažený rekord dojezdu na jedno nabití byl 394 km. Tento elektromobil disponoval spoustou inovací, ať už vysoce aerodynamickou karoserií se součinitelem odporu vzduchu 0,19 (Soudobá Škoda Felicia měla 0,34), palubní dobíječkou 6,6 kW nebo právě NiMH články. Tyto inovace a jejich praktický efekt vyvolaly enormní zájem o vozidlo. Navzdory zájmu veřejnosti společnost GM v roce 2002 téměř všechna auta nechala sešrotovat a projekt ukončila.

V roce 2003 byla založena firma Tesla motors, která již v roce 2006 začala prodávat jejich první elektrický vůz Tesla roadster. Pro trakční akumulátor byly použity lithium-iontové články, které poskytovaly dojezd až 400 km na jedno nabití. I přes enormní cenu byl o vůz zájem, a tak se v roce 2008 rozjela masová výroba. V tomtéž roce byl oznámen vývoj vozu Tesla model S.

V následujících letech začaly prodávat elektromobily dvě velké japonské automobilky. Mitsubishi motors využilo svou platformu „i“ a přetvořilo ji ve vozidlo Mitsubishi i-MiEV, které se vyrábí ještě v roce 2020 a patří se svými kopiemi Citroen C-Zero a Peugeot iOn k nejúspěšnějším elektromobilům. Dojezdem až 160 km a rychlodobíjením si získal oblibu zejména ve městech. Nissan v té době vyvinul vozidlo Nissan Leaf, které si drželo pozici nejprodávanějšího elektromobilu až do příchodu nových modelů automobilky Tesla. První generace vozidla dokázala ujet až 180 km na plné nabití a rovněž disponovala rychlodobíjením.

Renault začal již v roce 2009 prodávat své městské elektrické vozidlo, Renault Zoe. Dojezdem 180 km se řadilo k průměru, nicméně výrobci se namísto stejnosměrného rychlodobíjení rozhodli instalovat palubní dobíječku o výkonu až 43 kW, ta dokázala akumulátor dobít do půl hodiny. Cílili zřejmě na fakt, že v této době byla síť dobíjecích stanic velmi řídká, a tak bylo pragmatičtější spoléhat na zavedenou elektrickou střídavou síť.

O rok později v roce 2010 začal i koncern VW group instalovat do zavedených modelů vozidel elektrický pohon. Prvním vozidlem byl VW e-UP s dojezdem 160 km a rychlodobíjením

a o tři roky později pak e-Golf s téměř dvojnásobným dojezdem.

V roce 2012 začala Tesla vyrábět svůj model S (TMS). Tento luxusní sedan mohl uvést až 7 lidí, a v nejvyšší konfiguraci ujel až 500 km na jedno nabití. Zároveň s tímto vozem začala společnost Tesla stavět po celém světě síť tzv. superchargerů, tedy podnikových dobíjecích stanic s výkonem 150 kW, které dovedou dobít TMS 85 z 0 na 80 % (tedy dojezd 400 km) během 30 minut. Tímto vozem s počáteční cenovkou 1,5 mil korun odstartovala společnost Tesla motors (později Tesla) masovou produkci elektromobilů.

O rok později se objevil první plně elektrický model od firmy BMW a to i3. Tento vysoký elektromobil měl dojezd maximálně 160 km a skvělou dynamiku. Vysoký odpor vzduchu jej degradoval při meziměstských a dálničních rychlostech. Jednou z jeho zvláštností byl prodlužovač dojezdu jako příplatková výbava. REX z ang. Range extender, je malý benzínový agregát, který po vyčerpání energie v trakčním akumulátoru umožňoval vozidlu jet 80 km rychlostí. Koncepčně šlo tedy o sériové HEV.

V roce 2015 se do portfolia společnosti Tesla přidal vůz Tesla model X, dle konfigurace až 7místné SUV s kontroverzními „sokolími“ dveřmi. Dalším krokem bylo vozidlo pro širokou veřejnost. Tesla v roce 2017 představila vůz Tesla model 3, který měl být nejprodávanějším elektromobilem na světě s dojezdem okolo 500 km a cenovkou pod milion. Tento cíl byl splněn, ale pro malý zájem byl vůz s nižším dojezdem odstraněn z nabídky. V České republice lze nyní nejnižší konfiguraci vozu Tesla model 3 koupit za cca 1,3 mil korun. Jde patrně o nejlepší poměr ceny ku dojezdu v kombinaci s extrémní úsporností (koeficient aerodynamického odporu, tepelný management aj.) a podnikovou sítí Superchargerů. Celosvětově bylo těchto vozidel za tři roky prodáno přes 650 tisíc, zatímco za deset let prodeje dvou generací vozidla Nissan Leaf se prodej (na podzim 2020) pohybuje těsně pod 500 tisíci prodanými kusy.

Během posledních několika let se mimo jiné díky úspěchu značek jako je Tesla, Nissan, Renault a čínských konkurentů<sup>1</sup> začaly angažovat i zavedené značky. Korejské automobilky Hyundai a Kia vydaly několik velmi úspěšných elektromobilů. Hyundai Ionic je jedním z nejúspornějších vozů, a to jak v hybridním, tak v čistě elektrickém provedení. Hyundai Kona je prvním levnějším vozem schopným reálně ujet přes 400 km na jedno nabití. Audi vyrobila svůj E-tron, Jaguár má I-pace, Mustang vyvíjí Mach E, Mercedes má své EQC, VW vytvořil platformu MEB a na ni postavil VW ID3 a staví ID4, Škodovka krátkodobě zazářila s velmi levným elektromobilem Škoda CitigoE (cena začínala okolo 400 000 Kč) a pokračuje s vývojem Enyaqu.

Obnovení vývoje elektrických vozidel bylo umožněno díky rozmachu výkonových polovodičů pro řízení elektromotorů, ale zejména díky nové technologii sekundárních článků pro akumulaci elektrické energie. Nejprve články nikl-metal hydrid (NiMH), poté články na bázi lithia, umožnily rychlý nárůst klíčového parametru každého bateriového elektrického vozidla –

---

<sup>1</sup>Plnohodnotné čínské elektromobily, například značka BYD, se začaly objevovat na evropských trzích až koncem roku 2020

jeho dojezdu. Zároveň se významně snížila hmotnost akumulátoru, jeho rozměry a nároky na údržbu ve srovnání s dříve používanými technologiemi. Zvýšil se jak počet nabíjecích cyklů v průběhu životnosti akumulátoru, tak maximální dobíjecí a vybíjecí proudy (Reddy, 2010-06-05).

Podklady pro tuto kapitolu byly zpracovány ze zdrojů (Dunsheath, 1969-11-11; Chan, 1993; Wakefield, 1994; Wakefield, 1998; Kirsch, 2000-08-31; Mom, 2004-03-11; Anderson, 2010-03-30; Guarnieri, 2012).

## 4.2 Stav současného poznání

První vědecké články zabývající se zpřesněním měření, které pak přímo ovlivní odhad dojezdu, se objevují na přelomu tisíciletí. V roce 2001 se (Ceraolo et al., 2001) úspěšně pokusil zpřesnit dojezd pomocí měření teploty elektrolytu v olověných akumulátorech. Pokusy prováděl na dvou BEV. V dalším výzkumu přislíbil implementaci na mikročip do stávajících BEV. V tomtéž roce (Piller et al., 2001) zpracoval rozsáhlou rešerši možností měření kapacity akumulátorů. Přesné měření State of Charge (SoC) a degradace článků State of Health (SoH) jsou hlavními parametry pro výpočet dojezdu. Rovněž v roce 2001 byla vydána kniha *The Electric Car* (Westbrook, 2001-09-28), která uceleně nahlíží na problematiku elektromobilů.

V roce 2003 se objevil patent (Deiss et al., 2004-09-02), který, jak je vidět z názvu „Electric vehicle range determination method in which parameters and information relating to the vehicle, route, environment and driving manner are input to a computer so that a range can be determined prior to or during a journey“, se věnuje problematice, kterou se zabývá tato práce. Bohužel až v roce 2019 se objevil model Mercedes-Benz EQC, na jehož algoritmech se firma ZF Friedrichshafen podílí, a který tyto parametry nejspíše k odhadu dojezdu používá. Informace, do jaké míry jej k odhadu používá, je obchodním tajemstvím.

V roce 2005 byla vydána kniha *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives* (Emadi, 2005-05-25), která se úvodem okrajově zabývá BEV a HEV. Její přínos je zejména ve zpracování komplexních matematicko-fyzikálních modelů pohonných soustav, ze kterých čerpá většina článků zabývajících se modelováním elektromobilů. Druhou důležitou knihou vydanou v tomto roce byla (Ehsani, 2005). Ta podrobně vysvětluje fyzikální jevy jako je koeficient aerodynamického nebo valivého odporu.

V roce 2010 bylo publikováno (Reddy, 2010-06-05) 4. vydání *Linden's Handbook of Batteries*. V této knize jsou podrobně probírány parametry všech dostupných primárních i sekundárních článků. Právě výběr technologie, formátu a kapacity článků, z nichž je trakční akumulátor složen, je pro parametry každého BEV určující. Výběrem technologie sekundárních článků jsou přímo ovlivněny parametry proudové zatížitelnosti, cyklické zatížitelnosti, hmotnosti, objemu, bezpečnosti a dalších.

V roce 2009 byl představen automobil Tesla model S, který obsahoval implementovanou pokročilou navigaci. Navigace byla od roku 2012 součástí vozidel s „technologickým balíčkem“ a od března 2015 součástí všech vyrobených vozidel Tesla. Tato navigace jako první umožňovala naplánovat trasu s ohledem na SoC, SoH, teploty a provoz na cestě k cíli. Pokud hodnota dojezdu nestačila pro dosažení destinace, navigace nabízela možnosti zastavení u dobíjecích stanic a vypočetla čas nutného dobíjení. Tímto jako první sňala z řidiče část jeho zodpovědnosti za plánování trasy.

V roce 2011 napsal (Soylu, 2011-09-12) knihu s přesným matematickým modelem BEV. Zejména první kapitola knihy obsahuje cenné rovnice a grafy, které se stále používají ve výzkumech zabývajících se modelováním a simulacemi BEV.

Studie (Franke; Neumann et al., 2011) se zabývala výzkumem „Range anxiety“. Zjistila, že psychologické bariéry adaptace BEV nejsou zapříčiněny strachem z dojezdu. Většina respondentů výzkumu nepocítovala při zapůjčení BEV ve svém běžném provozu více stresu než v ICE vozidle. Na druhou stranu zdůraznila potřebu dalšího zlepšení dojezdu vzhledem k enviromentálnímu dopadu a k ceně BEV.

Autoři (Dib et al., 2011) se na základě shromážděných dat pokusili navrhnout algoritmus pro optimální průběh rychlosti z hlediska spotřeby energie. V závěru autoři zmiňují, že malá změna v chování řidiče může uspořit mnoho energie. Rovněž navrhuje, aby se tyto změny děly na základě návrhu speciálního rozhraní.

V roce 2012 se autoři (Neubauer; Brooker et al., 2012) pokusili o modelování ekonomické výhodnosti BEV, jako měřítko použili citlivost k chování řidičů, dojezdu vozidla a dobíjecí strategie. V tomže roce objevili dva patenty, snažící se o odhadování dojezdu (Cho et al., 2012) a plánování dobíjení po trase (Paul et al., 2012).

V roce 2013 byla vydána publikace, která významně pomáhá s modelováním BEV a tím zpřesňování modelů pro odhad dojezdu. Kniha (Rahn et al., 2013-02-01) se přímo zaměřuje na sekundární elektrochemické články v elektrických vozidlech. Provádí porovnávání technologií, vysvětluje moderní postupy určování SoC, SoH pro různé chemické články, a hodnotí správnou funkcionalitu a omezení BMS. Právě BMS a jeho nastavení hrají významnou roli v účinnosti, životnosti, a zejména bezpečnosti každého bateriového vozidla. V tomtéž roce (Franke; Krems, 2013) provedli rozsáhlou analýzu nároků uživatelů na dojezd BEV. V první části výzkumu zjistili, jaký je denní nájezd obyvatel v několika částech světa. Podrobná data byla diskutována v kapitole 3.1. Průzkumu se účastnilo více než 13 000 dotazovaných ze 17 zemí. Pro obyvatele Německa by BEV muselo mít dojezd alespoň 320 km. Což znamená více než osminásobek průměrného denního nájezdu a více než dvojnásobek potřeby obyvatel Německa s percentilem zastoupení 95. V další práci (Carlson et al., 2013) autoři porovnali vliv hmotnosti na spotřebu ICE vozidel, HEV a BEV. Díky vyšší hmotnosti BEV a HEV se přidaná hmotnost nepoděpíše na spotřebě takovou mírou jako na ICE vozidlech. Ve většině testovaných prostředí má nejmenší nárůst spotřeby BEV. Vzhledem ke globálně menšímu dojezdu BEV oproti HEV

či ICE vozidlům to však má větší dopad na celkový výsledek. V publikaci (Rodgers; Frey et al., 2013) je odhadnut algoritmus používaný v komerčně dostupných BEV, a to na základě dostupných patentů a několika úvah. Jsou zde zobrazeny parametry, které ovlivňují dojezd BEV a snaha o jejich kvantifikaci. Celý algoritmus je odzkoušen v simulaci. V závěru autoři zmiňují možnost aplikace reálných dat z provozu, přidání aktuálních dat z dopravní situace a opakovaného měření jedné trasy k identifikaci jednotlivých vlivů na celkový dojezd. Další autoři v publikaci (Kuew Wai Chew; C. K. Leong et al., 2013) definovali zvýšení spotřeby a tím snížení dojezdu dle změny elevace či jízdě po dálnici. Výsledkem porovnání je 36% rozdíl při stoupání do kopce, 30% rozdíl na dálnici a 15% rozdíl při jízdě z kopce.

V roce 2014 v publikaci (Yang et al., 2014) autoři vypočetli na základě modelu vozidla procentuální zvýšení či snížení spotřeby s každým stupněm stoupání nebo klesání trasy. Autoři článku (Kuew Wai Chew; Chee Ken Leong, 2014) upravili svůj předchozí výzkum (Kuew Wai Chew; C. K. Leong et al., 2013) a aplikovali data z Google Application Interface (API). Výsledky se však nezměnily.

Publikace (Wilhelm et al., 2013) se zaměřila na identifikaci hmotnosti vozidla pomocí Newtonových zákonů. Touto jednoduchou a technicky snadno implementovatelnou metodou dosáhl autor pozoruhodné přesnosti. V laboratorních podmínkách, kdy pro identifikaci použil maximální možnosti akcelérátoru, dosáhl 3% přesnosti. V běžném provozu pak 10%. Bohužel 10% chyba znamená až 120kg rozdíl ve hmotnosti, což může způsobit další nepřesnosti v dojezdu.

V publikaci (Rodgers; Zoepf et al., 2014) se autoři zaměřili na statistické zpracování naměřených dat z elektromobilů BMW a vyhodnocovali parametry ovlivňující dojezd. Mezi jejich nejdůležitější závěry patří, že HVAC (systémy vyhřívání ventilace a klimatizace) může při nízkých rychlostech ovlivnit dojezd až o 30%. Dále je diskutována možnost, kdy by bylo možno pomocí predikce s informacemi o venkovní teplotě zanést tento údaj do výpočtu dojezdu.

Autoři publikace (Shibata et al., 2015) vytvořili matematický model BEV i-MiEV japonského výrobce automobilů Mitsubishi a porovnali ho s reálnými daty z provozu tohoto modelu. Mezi zásadní výsledky patří, že v městském provozu je využito 74% energie k akceleraci, 5% k překonávání aerodynamického odporu a 21% k jízdě samotné. V meziměstském provozu je 23% energie spotřebováno překonávání aerodynamického odporu a 77% k jízdě samotné. V kopcovitém terénu spotřebuje 88% energie překonávání výškových rozdílů, 9% jízda a 3% překonávání aerodynamického odporu. Dalším důležitým poznatkem je, že klimatizace může spotřebovat až 50% energie v trakčním akumulátoru.

V publikaci (Tannahill; Masrur et al., 2015) začali autoři z univerzity ve Wollongongu publikovat své výsledky z výzkumu elektromobility. Vzhledem k zjištění, že SoC a SoH jsou zásadními údaji pro přesný odhad dojezdu, se tato publikace zabývá jejich přesným měřením. K cyklickému zatěžování LiFePO<sub>4</sub> akumulátorů používají NEDC metodiku. SoC měřili dle vytvořeného algoritmu a dosáhli zmenšení chyby v 5 ze 6 měřených případů.

V roce 2016 se autoři (Eckstein et al., 2016) pokusili snížit spotřebu elektrické energie pro HVAC pomocí Model Predictive Control (MPC) algoritmu. Dle grafů se cíle povedlo dosáhnout, avšak není zmíněna žádná hodnota vyčísující úsporu. Ve stejném roce (Wager et al., 2016) popsali rozdíl mezi deklarovanými parametry dojezdu (metodikou NEDC) a skutečným dojezdem v reálných podmínkách. Vytvořili 4 scénáře od městské jízdy bez HVAC až po dálniční rychlost s upevněným střešním nosičem, posádkou a HVAC nastaveným na komfortní teplotu. Výsledky pokusů ukázaly, že původně 200km dojezd Nissanu Leaf (24kWh) se pohybuje v rozsahu 38–128 km a dojezd Mitsubishi I-MiEV je místo 140 km reálně 40–137 km. Právě tato nepřesnost odrazuje potenciální kupce od nákupu BEV. Autoři (Mruzek et al., 2016) vytvořili řadu simulací založených na reálných datech a vyrobeném prototypu elektrického vozidla. Většina výzkumů se zabývala vhodnou volbou komponent pro toto městské vozidlo s ohledem na ekonomiku provozu. Přínosný je zejména závěr, že pro 70km dojezd vozidla a porovnání dvou trakčních akumulátorů, 8kWh a 24kWh, je rozdíl ve hmotnosti, a tím přímo úměrný rozdíl v ekonomice provozu. Verze s lehčím akumulátorem ujela na každou 1 kWh uložené energie o 1,17 km více. Z tohoto poznatku vyplývá, že malá BEV s dojezdem přizpůsobeným potřebám městského provozu jsou lepším řešením než BEV s velkým a těžkým akumulátorem, a to jak z pohledu ekonomiky, ekologie a zejména úspornosti provozu. Menší vozidla jsou rovněž praktičtější z pohledu parkování v přelidněných městech.

Autoři (Li et al., 2016) vytvořili diagram příčin a následků (Išikawův diagram), který dle jejich názoru pokrývá všechny vlivy působící na dojezd BEV. Dle těchto vlivů vytvořili model, který dále podrobili testu a srovnali s reálnými daty BEV. Odchylka modelu od skutečných dat byla v případě městského provozu pouze 0,78 % a v případě dálničního provozu 4,89 %. Jak sami autoři přiznávají v diskuzi, celá empirická práce je bohužel vysoce optimalizovaná pro konkrétní místo a vozidlo. Vzhledem k podnebí Sydney, nepokrývá například problematiku nízkých teplot.

Kolektiv autorů publikace (Tannahill; K. M. Muttaqi et al., 2016) vytvořil komplexní algoritmus počítající SoC v místě dojezdu, který bere v úvahu spotřebu do největších podrobností. Rozsáhlý matematický model uvažuje převýšení, hmotnost posádky, směr a rychlost větru, maximální rychlost, HVAC a pasivní spotřebu vozidla od světla přes elektroniku až po využití stěračů. Poprvé zde autor zmiňuje pojem „Hill hazard“, tedy situaci, kdy sice v cíli vozidlo má kladný SoC, ale během trasy nastal okamžik, kdy SoC klesl pod kritickou úroveň. Součástí algoritmu je systém doporučující či nařizující zastavení u dobíječky a umožňující výpočet času stráveného dobíjením.

Autoři (K. W. Chew et al., 2016) navázali na svou předchozí práci (Kuew Wai Chew; C. K. Leong et al., 2013) a na základě dřívějších výpočtů provedl praktické experimenty. Zatímco experimenty s jízdou v kopcovitém terénu měly očekávané výsledky, výsledky jízdy různou rychlostí na určené trase přinesly zajímavá zjištění. Nejúspornější rychlost BEV (tzv.

hypermiling) nelze přímo vyvodit z grafu účinnosti motoru<sup>2</sup>. Aditivní konstantní chybou je „pasivní spotřeba“ a HVAC. Pro maximální úsporu energie je tedy potřeba jet optimální rychlostí, která závisí na mnoha parametrech a včetně příkonu jednotlivých komponent BEV.

V roce 2017 svou předchozí práci vylepšili autoři (Sarrafan; K. M. Muttaqi; Sutanto; G. E. Town, 2017). Přidali možnost volby cesty ve dne nebo v noci a zpracovali Graphic User Interface (GUI), ve kterém lze zvolit standardní volby pro Google API, jako je vyhnutí se dálnicím, placeným cestám atp. GUI po zadání cílové a počáteční polohy vypočte SoC pomocí algoritmu v cíli, ověří, jestli neexistuje „hill hazard“ a naplánuje trasu. Pokud se SoC blíží nule, navrhne dobíjení. Pokud je SoC menší než bezpečné nebo nastane na trase „hill hazard“, dobíjení přikáže. Z dat veřejné dobíjecí infrastruktury vyhledá dvě nejbližší stanice na trase a po manuálním výběru k ní navigaci nasměruje. V budoucnu mají autoři v plánu zaměřit se na sledování obsazenosti dobíjecích stanic a implementaci simulovaného GUI do vestavěného zařízení. Dalším krokem stejných autorů v publikaci (Sarrafan; Sutanto; K. M. Muttaqi; G. Town, 2017) byly úvahy o účinnosti motoru při různých rychlostech a také zařazení pasivní spotřeby do výpočtu. S tímto algoritmem dosahují přesnosti 0,5 % a další prostor pro vylepšení vidí v implementaci odhadu spotřeby v závislosti na předpovědi počasí a informacích o dopravní situaci. Nevýhodou těchto výzkumů je neuvážování o extrémně chladném počasí a s tím spojená absence úvah o změně impedance akumulátoru při promrznutí, o nutnosti tepelného managementu a pomalejšího stejnosměrného rychlodobíjení. Zejména vlivem přímořského podnebí je teplota stabilnější než ve vnitrozemské České republice. Rekordně nízká teplota je ve Wollongongu 0,8 °C a průměrná celoroční teplota přibližně 18 °C. V ČR byla naměřena rekordní teplota -42 °C a celoroční průměr je 5,5 – 9 °C. Další publikací těchto autorů byla (Sarrafan; Sutanto; K. M. Muttaqi, 2017), která se soustředila na vylepšení metody odečtu energie a tím odvození SoC z akumulátoru. Využití nelinearity napětí článků při maximálním a minimálním SoC může poskytnout cenné kilometry dojezdu navíc.

V roce 2018 vytvořil kolektiv autorů (Hardman et al., 2018) obsáhlý přehled dobíjecí infrastruktury, ve které zpracoval na 120 literárních pramenů, zejména pak simulace a dotazníky z různých částí světa. Výsledky výzkumů shrnul takto: Nejdůležitější a nejčastější je dobíjení doma, na druhém místě je dobíjení v práci a až na posledním místě v četnosti a důležitosti je dobíjení na veřejných stanicích. Dobíjení na veřejných stanicích často brání nekompatibilita konektorů nebo možnosti přihlášení a platby. Dalším poznatkem jsou důvody pro nákup BEV. Podle autora to jsou nízké provozní náklady a nízké náklady na opravy. Tyto výhody by měly být udržitelné, na druhou stranu dobíjení zdarma vede k nežádanému obsazení rychlonabíjecích stanic. Autor se rovněž vyslovil k poměru počtu potřebných veřejných dobíjecích stanic ku počtu elektromobilů. Bohužel chybějící data neumožnila globální náhled. Autor musel udělat pouze částečný závěr ke studiím provedeným v Německu. Z jedné z provedených studií vply-

---

<sup>2</sup>Uveden například v knize (Soylu, 2011-09-12) strana 17



nul poměr 10 rychlonabíjecích stanic pro každých 1000 BEV. Posledním závěrem prováděné studie je dopad na rozvodnou síť. Dle autora může v budoucnu velký nárůst BEV způsobit poruchy v rozvodné síti. Sám přiznává, že nejlepším regulačním nástrojem je dynamická cena a dobíjení BEV v době přebytků elektrické energie. Autor si je vědom nevole uživatelů vzdát se kontroly nad dobou a úrovní nabití vozidla.

Autoři (Melliger et al., 2018) zpracovali švýcarsko-finskou studii, ve které s pomocí reálných dat každodenních nájezdů a schopností současné technologie BEV vypočetli schopnost pokrýt každodenní potřeby obyvatel. Studie je přínosná simulací vlivu možností dobíjení, a to od domácího, přes dobíjení v práci až po veřejné stanice. V případech plné elektrifikace je možno pokrýt použitím soudobých BEV ve Švýcarsku až 99,6 % a ve Finsku až 98,6 % každodenních cest.

Autoři publikace (Sautermeister et al., 2018) se pokouší o zpřesnění dojezdu a zaměřují se zejména na akumulátor, jeho SoC a SoH a predikci spotřeby energie. Ačkoliv článek vyslovuje četné statistické úvahy a kvantifikuje poznatky, v závěru autor přiznává, že nejistota predikce dojezdu se pohybuje od 12 do 23 % a že v budoucím výzkumu bude muset brát v úvahu další prvky spotřeby, jako je HVAC, počasí a hmotnost vozidla.

Kolektiv autorů z univerzity ve Wollongongu v roce 2018 publikoval několik zásadních prací pro tento výzkum. V první publikaci (Sarrafan; K. Muttaqi et al., 2018) autoři ve snaze pochopit a zpřesnit měření SoC a SoH aplikovali algoritmus nejmenších čtverců na lithium-iontových článcích, dle jejich závěru dosáhli lepších výsledků v situacích delších vzorkovacích časů a dokáží tak odhadnout SoC i SoH s větší přesností. Zároveň implementovali „faktor zapomínání“, což pomáhá zvýšit relevanci aktuálních dat. Model byl ověřen na NEDC cyklu pro články používané ve vozidle Nissan Leaf. V další publikaci (Sarrafan; K. M. Muttaqi; Sutanto; G. E. Town, 2018) autoři použili své algoritmy ze staršího vozu na konvenční BEV Nissan Leaf. Rovněž použili online data o provozu, počasí a trase jako takové. S daným algoritmem dosáhli ve skutečném provozu chyby menší než 1 %. V publikaci (Sarrafan; K. M. Muttaqi; Sutanto, 2018) autoři vytvořili algoritmus pro měření SoC článku z Nissanu Leaf a navrhuje implementaci čtení ze sběrnice CAN a zpracování tohoto algoritmu na mobilním zařízení.

Autoři (Sajadi-Alamdari et al., 2019) zpracovali případovou studii, ve které vytvořili systém autopilota pro zkušební trasu na okruhu. Porovnali energetickou náročnost řízení člověka, Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) algoritmu a deadzone-quadratic NMPC algoritmu. Dle jejich výsledků činil rozdíl ve spotřebované energii, a tedy i v dojezdu +7.56 % a +13.65 % ve prospěch algoritmů. Tím dokázali myšlenku, že algoritmus může dosáhnout lepších výsledků spotřeby než člověk.

Publikace (Varga et al., 2019) je pečlivě sestavená studie vlivů BEV na dojezd. Vlivy identifikují a jeden po druhém vysvětlují a kvantifikují. Nejzajímavější je graf vlivu parametrů na dojezd v diskusi. Ten vypovídá, že SoC ovlivňuje dojezd z 54 %, okolní teplota z 25 %

(uvažuje se používání HVAC, tedy jiné než optimální podmínky) a 10 % může ovlivnit chování řidiče. Trasa ovlivní změnu SoC 6 % a provoz na trase přibližně 5 %.

Dle prostudovaných materiálů se do začátku roku 2020 nikdo ve vědecké komunitě systematicky nezabýval zpřesňováním dojezdu BEV. Výjimkou je výzkumný tým univerzity ve Wollongongu, který modelem a vlastními algoritmy dovedl odhadnout spotřebovanou energii s chybou přibližně 1 %. To však pro stále stejné trasy a tedy není možno posoudit robustnost algoritmu. Vzhledem ke specifickému podnebí okolí Sydney je rovněž otázkou jakou chybovost by algoritmus vykazoval při použití ve vnitrozemském podnebí mírného pásu a jeho výkyvech teplot. Byly nalezeny poznatky směřující k odhadu změny hodnoty dojezdu na základě použití HVAC systémů. Nebyly však nalezeny jakékoliv zdroje, které by se implementací omezení toků energií snažily zlepšit dojezd BEV. Dle provedené rešerše nebyl nalezen žádný výzkumný tým mající komplexní model BEV se započtením všech potřebných parametrů. To mimo jiné znamená, že nemůže s dostatečnou robustností a přesností vypočítávat trasu a porovnávat jednotlivé trasy vzhledem k jejich energetické náročnosti. Tato práce je unikátním ve vytvoření modelu BEV a implementaci vlastního algoritmu pro výpočet dojezdu a řízení toku energií.

### 4.3 Vlastní výzkum

Během aktivního používání elektromobilu katedry byla zjištěna značná odchylka mezi zobrazeným a skutečným dojezdem. Názor, že jde o problém konkrétního modelu BEV, vyvrátily další zkušenosti. Vývojově starší Nissan Leaf i Peugeot iOn vykazovaly odchylky v přesnosti až desítky procent. Proto byla v rámci služebních cest a účelových tras zaznamenávána data několika BEV. I nová Hyundai Kona, která byla světovou novinkou, a svou cenou, dojezdem a oblíbeností patří ke světové špičce, neměřila přesně.

Jak Nissan Leaf tak Hyundai Kona nevyužívají palubní navigace vozidla k přesnému odhadu dojezdu. Z těchto důvodů se může stát, že v extrémních podmínkách dlouhé, energeticky náročné trasy nebude dosaženo cíle. Naopak při setrvalé jízdě stálou rychlostí s neagresivním zrychlováním může dojít ke zvýšení dojezdu. Několik takových tras je zobrazeno v tabulce 4.1<sup>3</sup>. V prvním případě byl odhad dojezdu natolik nepřesný, že bylo potřeba vozidlo odtáhnout k nejbližší dobíjecí stanici.

Dojezd obou vozidel je značně ovlivněn stylem řízení, ale zejména vysokou rychlostí či nerovností terénu. Všechny tyto parametry lze získat za předpokladu plánování trasy s využitím mapových podkladů. Téměř všechny modely BEV Tesla jsou vybaveny navigačním systémem, který po zadání cíle zobrazuje možnosti trasy, včetně dobíjecích stanic. Tyto generované trasy nezohledňují pouze zvýšenou spotřebu na dálnici, ale také využívají data z interní databáze. Tato data průměrují spotřebu ostatních vozidel Tesla na konkrétních úsecích vybrané trasy.

---

<sup>3</sup>V této fázi práce není potřeba specifikovat konkrétní podmínky na trase. Jedná se o sběr dat od koncových uživatelů a jejich zkušeností, a tím o motivaci k řešení této práce.

Tabulka 4.1: Přehled vybraných tras a chyb odhadů dojezdu.

Vybranná vozidla (energie aku.)	Zvolená trasan (Start–Cíl)	Celková vzdálenost (km)	Dojezd na začátku (km)	Dojezd v cíli (km)	Chyba dojezdu (km)	Chyba dojezdu (%)
Leaf 24 kWh	Ostrava–Olomouc	84	154	-1	-71	-46
Kona 64 kWh	Praha–Brno	209	279	6	-64	-23
Leaf 24 kWh	Vystrkov–Vyškov	144	161	28	11	7
Leaf 24 kWh	Vystrkov–Praha	100	117	66	49	42

Odhad je proto mnohem přesnější a liší se od reality jen tak, jak se liší styl jízdy současného řidiče od stylu jízdy průměrného řidiče BEV Tesla.

Firma Tesla považuje konkrétní data a algoritmus zpracování těchto dat pro výpočet dojezdu za součást svého duševního vlastnictví, a proto je možno povahu algoritmu výpočtu dojezdu pouze odhadnout. Vzhledem k přesnosti a spolehlivosti dosažené při výpočtu dojezdu pro tyto BEV lze očekávat, že algoritmus bude poměrně složitý a bude brát v úvahu množství informací jak ze stavu vozidla, tak z mapových podkladů.

Na základě těchto poznatků bylo nutno zjistit, jakým způsobem určují ostatní BEV zbývající dojezd. Oslovené automobilky tuto odpověď nenabídlly s opodstatněním, že algoritmus výpočtu dojezdu je jejich duševním vlastnictvím. Rešerše pramenů (viz 4.2) rovněž neposkytla odpověď, a proto byl proveden pokus o vlastní identifikaci těchto algoritmů.

Vzhledem k měnícím se hodnotám při plném nabití akumulátoru bylo odhadnuto, že vozidlo ve výpočtu dojezdu zohledňuje předchozí spotřebu vozidla. Hodnoty v BEV Nissan Leaf kolísaly od 120 km do 182 km dojezdu při 100 % SoC. Jde tedy o extrapolaci založenou na regresní analýze beroucí v úvahu dosavadní spotřebu a zbývající energii v akumulátoru vozidla. Aktuální dojezd lze vyjádřit rovnicí 4.1,

$$R = \frac{E_{aku}}{\frac{P_{kin} + P_{HVAC} + P_{ele} + P_{BTS}}{v}}, \quad (4.1)$$

kde  $R$  je dojezd v  $km$ ,

$E_{aku}$  je uložená energie v  $kWh$ ,

$P_{kin}$  je příkon potřebný pro pohyb v  $kW$ ,

$P_{HVAC}$  je příkon pro vyhřívání, ventilaci a klimatizaci v  $kW$ ,

$P_{ele}$  je elektronika vozidla v  $kW$ ,

$P_{BTS}$  je teplotní management akumulátoru v  $kW$ ,

a  $v$  je rychlost vozidla v  $km/h$ .

Tato základní rovnice předpokládá veškerou spotřebu přepočtenou na vzdálenost, což lze s úspěchem aplikovat pouze u  $P_{kin}$ . U ostatních se jedná o takzvanou pasivní spotřebu, a

i když může nepřímo na vzdálenosti záviset, je vztažená k času. Jako příklad může sloužit elektrická energie spotřebovaná světlomety, ventilátorem nebo audio systémem.

Pro pochopení algoritmů odhadujících dojezd v BEV, byla extrahována telemetrická data z provozu vozidel. Ta se skládala z více než 250 proměnných. Údaje pro experimenty byly zaznamenávány ze dvou nejčastěji používaných BEV Nissan Leaf (24 kWh) a Peugeot iOn (16 kWh). U obou vozidel byla zaznamenána data z několika jízd. Ta se lišila časem, vzdáleností, převýšením a rychlostí jízdy. Další zpracování a testy algoritmů byly prováděny pomocí programu MATLAB.

Pro výpočet dojezdu byly testovány dva různé algoritmy. Jádro těchto algoritmů je odvozeno z obecné rovnice 4.1. Způsob výpočtu je původní, je inspirován pouze úvahou o klouzavém průměru. První původní algoritmus zahrnuje klouzavý průměr za účelem získání přesnějšího odhadu, zbývající dojezd je vypočten jako poměr mezi skutečnou energií uloženou v akumulátoru a průměrnou spotřebou energie. Výpočet je prováděn diskrétně pro celočíselné hodnoty ujeté vzdálenosti  $k$ ,

$$R_a[k] = \frac{E_{bat}[k]}{\frac{\sum_{i=k-n}^k E[i]}{n}}, \quad (4.2)$$

kde  $R_a$  je dojezd v  $km$ ,

$k$  je iterace cesty po 1  $km$ ,

$E_{bat}$  energie uložená v akumulátoru v  $kWh$ ,

$E$  je průměrná energie spotřebovaná v BEV v  $kW/km$ ,

$n$  je definovaný počet vzorků,

$i$  je iterace klouzavého průměru.

Druhý původní algoritmus definovaný rovnicí 4.3 rozšiřuje rovnici 4.2. Hlavní myšlenkou této metody je, že základní odhad dojezdu pro každou celočíselnou hodnotu ujetých  $km$   $k$  je o tuto hodnotu menší než počáteční odhad  $R_b[0]$  (vypočítaný na začátku jízdy rovnicí 4.3). Konečná hodnota je upravena o rozdíl skutečného a posledního odhadu dojezdu získaného z rovnice 4.2. Pokud nedojde ke změně spotřeby energie za poslední ujetý kilometr, měl by tento rozdíl být roven  $-1$  a podle druhé části rovnice 4.3 to nemá vliv na odhad.

$$R_b[k] = R_b[0] - k + (R_a[k] - R_a[k-1] + 1), \quad (4.3)$$

Průběh odhadovaného dojezdu je následně vyhlazen váženým průměrem aktuálního a předchozího výsledku takto:

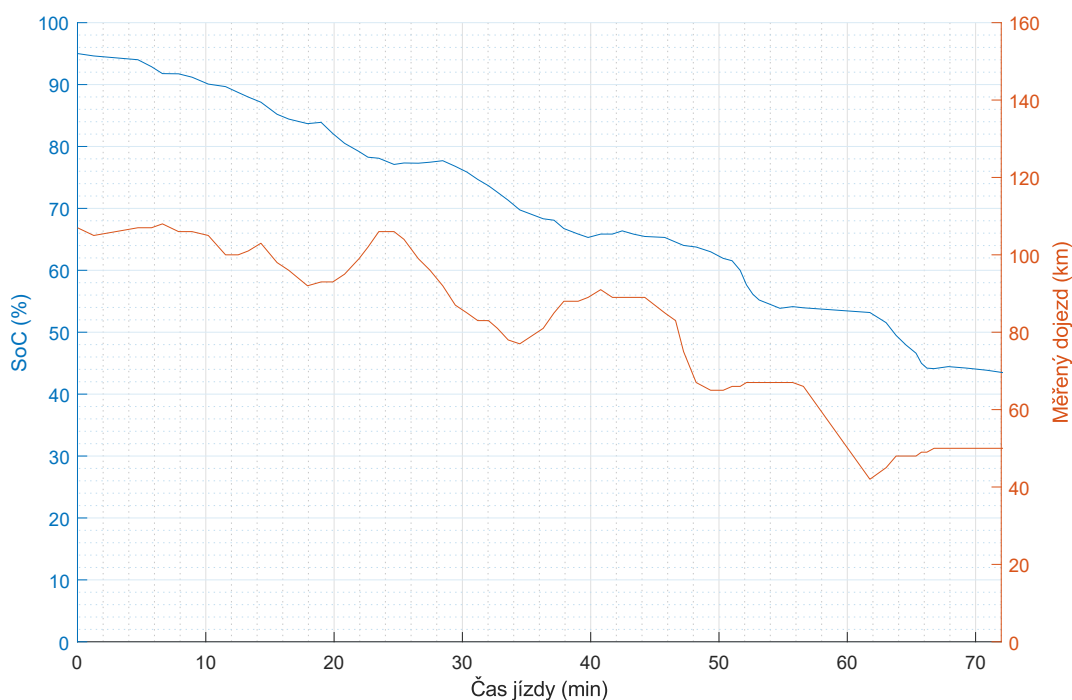
$$R_{bavg}[k] = \frac{3 \cdot R_{bavg}[k-1] + R_b[k]}{4}. \quad (4.4)$$

V následujícím textu bude prezentována aplikace těchto algoritmů na výpočet dojezdu a rovněž budou tyto výpočty porovnány s palubním odhadem dojezdu ze dvou různých elektrických vozidel – Nissan Leaf a Peugeot iOn.

### 4.3.1 Nissan Leaf

Toto vozidlo zaznamenává 159 proměnných každé dvě sekundy, což poskytuje dostatek dat pro diagnostiku. Jedním z neregistrovaných údajů důležitých pro další výzkum je dojezd, který je zobrazen pouze na ukazateli ve vozidle. Tento důležitý údaj byl získán fotoaparátem pomocí časosběrných fotografií zobrazených dat na displeji během měřených cest.

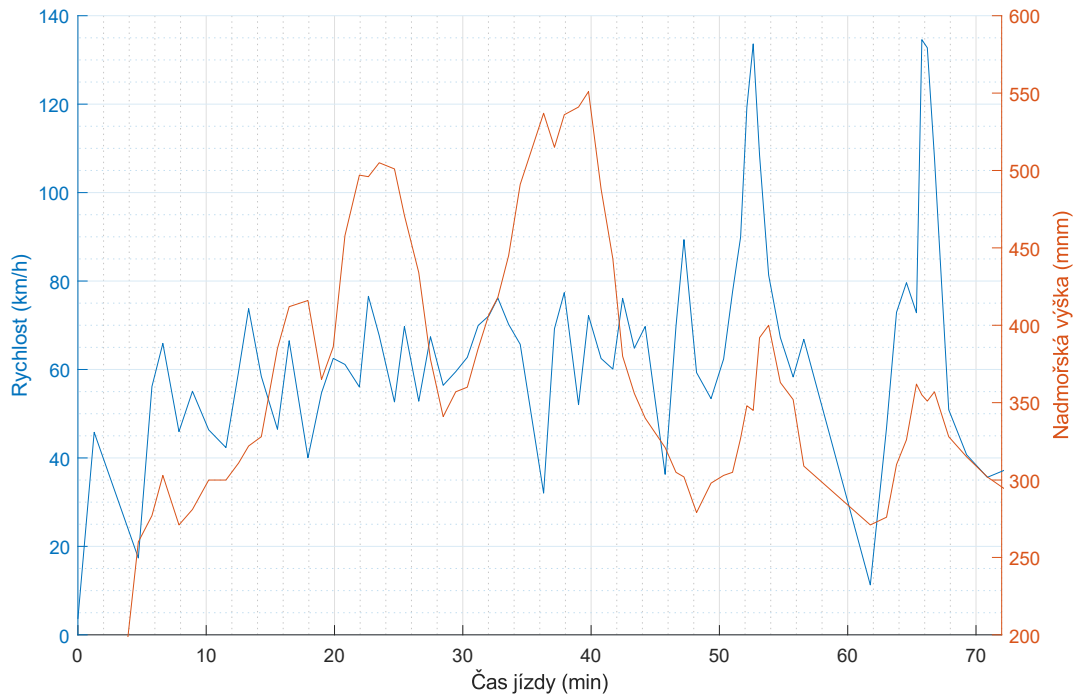
Graf stavu nabití akumulátoru (SoC) a zobrazený dojezd BEV v závislosti na čase je zobrazen na obrázku 4.1.



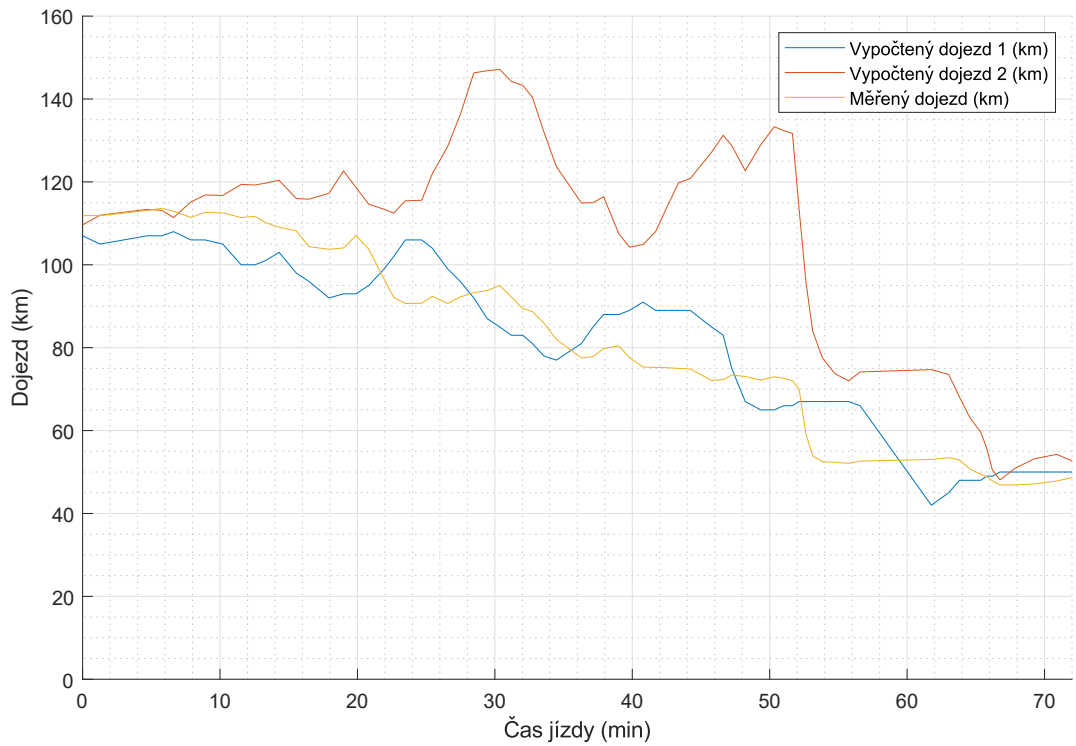
Obrázek 4.1: Leaf: SoC a dojezd v závislosti na čase.

Na obrázku 4.1 je patrný nepřiměřeně malý dojezd oproti standardům tohoto BEV. To je způsobeno relativně neúspornou jízdou po dálnici před měřeným úsekem. Z tohoto důvodu je možno vidět poměrně neobvyklý jev, kdy dojezd místo jeho logického klesání stoupá, a to i v místech, kde je kopcovitý terén. Rychlostní a výškový profil trasy je zobrazen na obrázku 4.2.

Výše uvedený jev potvrzuje předpoklad, že výpočet dojezdu tohoto vozidla je variantou klouzavého průměru, tj. zahrnutí spotřeby posledních jízd pro výpočet aktuálního dojezdu. Porovnání zobrazeného dojezdu vozu a vypočítaných dojezdů pomocí rovnice 4.2 a rovnice 4.4 jsou zobrazena na obrázku 4.3.



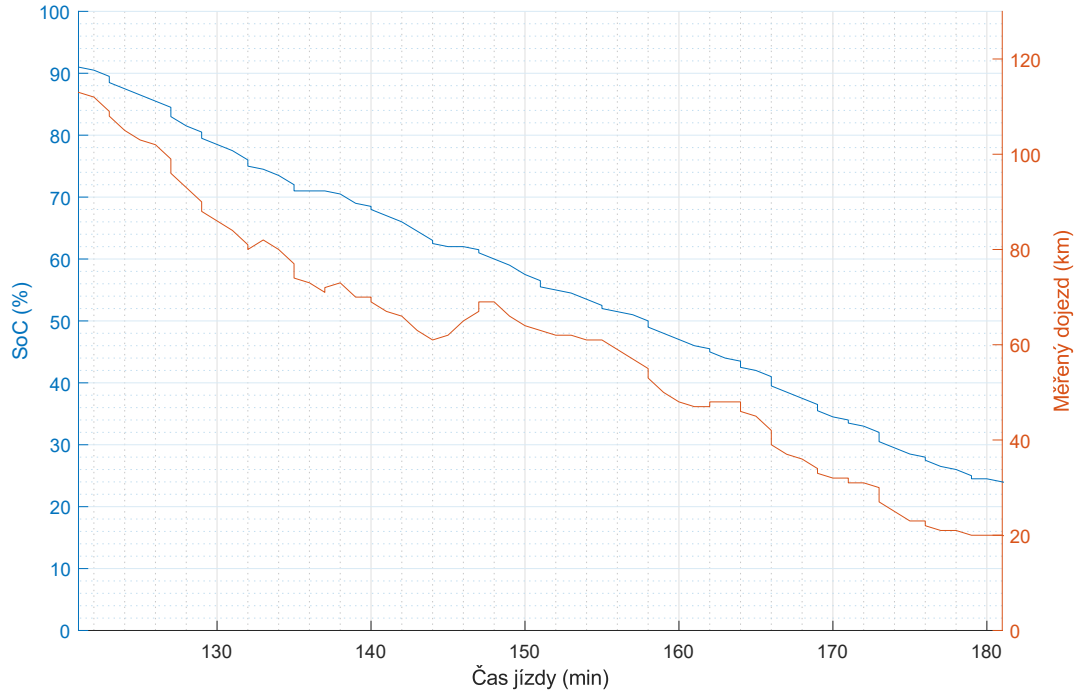
Obrázek 4.2: Leaf: Rychlost a nadmořská výška v závislosti na čase.



Obrázek 4.3: Leaf: Porovnání vypočítaného a naměřeného dojezdu v závislosti na čase.

### 4.3.2 Peugeot iOn

Vozidlo zaznamenává 127 proměnných do tří datových protokolů. Každý datový záznam má vlastní techniku protokolování, jeden protokol je vytvářen každou sekundu, jeden protokol každý ujetý kilometr. V protokolu je zapsán i údaj o dojezdu. Graf SoC a dojezdu BEV v závislosti na čase je zobrazen na obrázku 4.4.



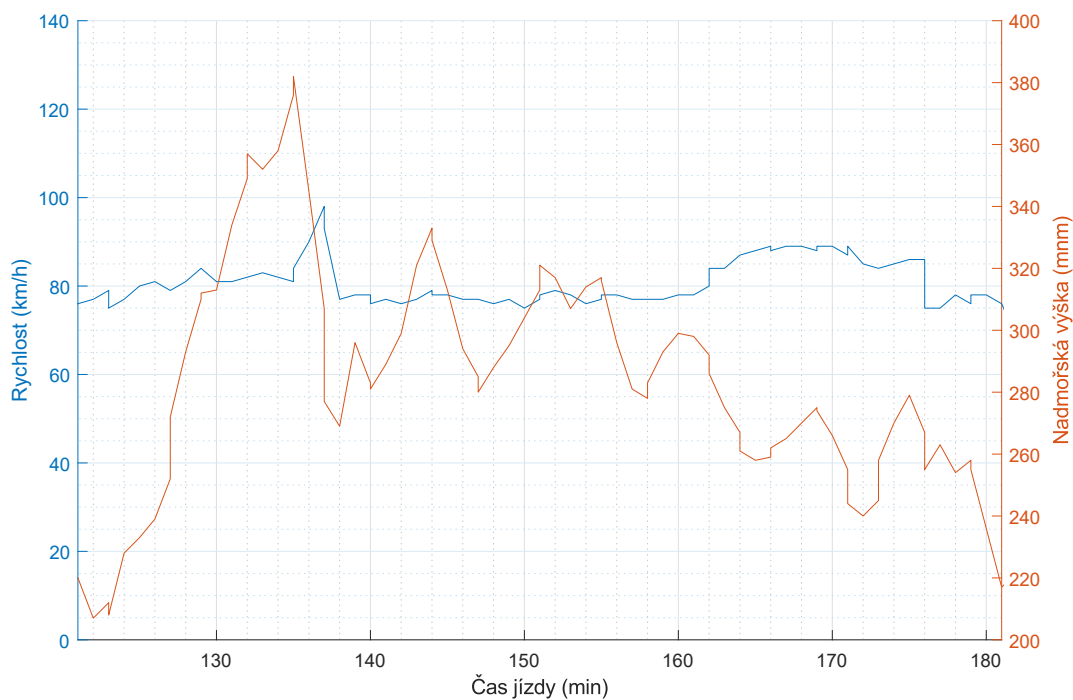
Obrázek 4.4: iOn: SoC a dojezd v závislosti na čase.

Na rozdíl od protokolu Nissan Leaf v těchto grafech lze pozorovat, že toto malé městské BEV řídil zkušený řidič po dlouhé trase. Z toho vyplývá, že odchylky naměřeného a předpokládaného dojezdu jsou relativně malé.

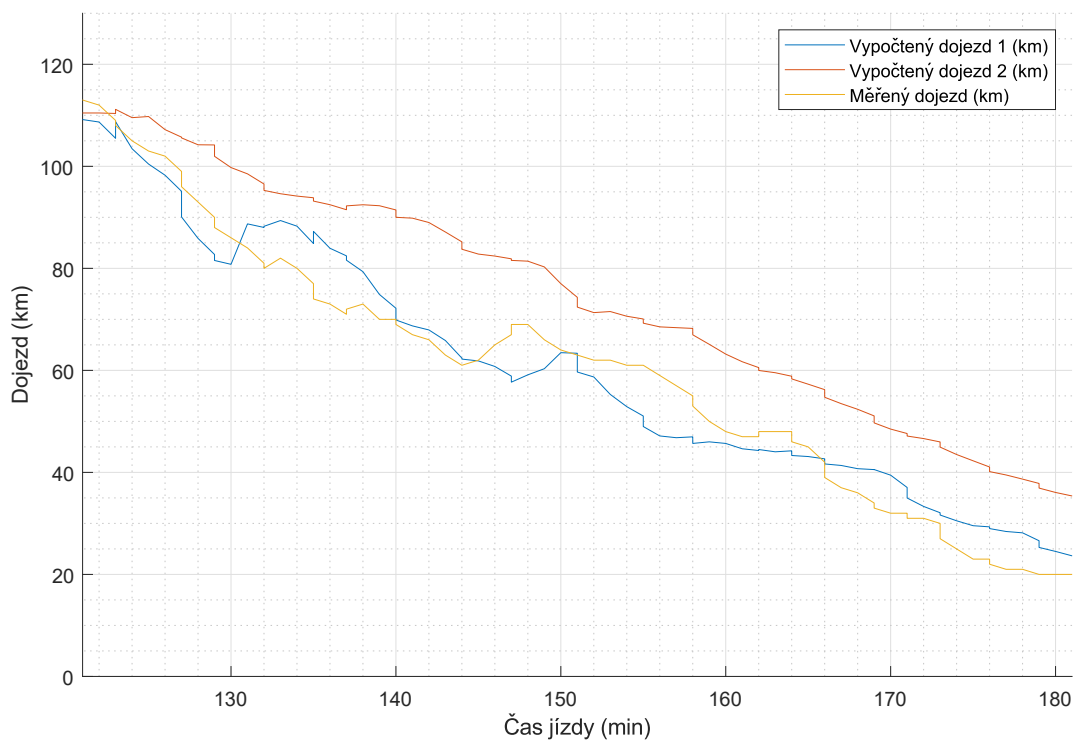
Rychlostní a výškový profil trasy je uveden na obrázku 4.5. Rychlost je téměř konstantní po celou cestu, přestože toto vozidlo nemá ve výbavě tempomat. Porovnání měřeného a zobrazeného dojezdu vozu a vypočítaných dojezdů pomocí rovnice 4.2 a rovnice 4.4 je zobrazeno na obrázku 4.6.

### 4.3.3 Vyhodnocení výsledků

Jedním z hlavních parametrů ovlivňujících přesnost výpočtu dojezdu je základ klouzavého průměru – parametr  $n$ . Parametr  $n$  v rovnici 4.2 byl expertně zvolen jako  $n = 30 \text{ km}$ . Variace této hodnoty lze provést pro další výpočty, jak je znázorněno v grafu 4.7. Graf zobrazuje skutečnost, že čím nižší je základ klouzavého průměru, tím lépe reaguje algoritmus na změny



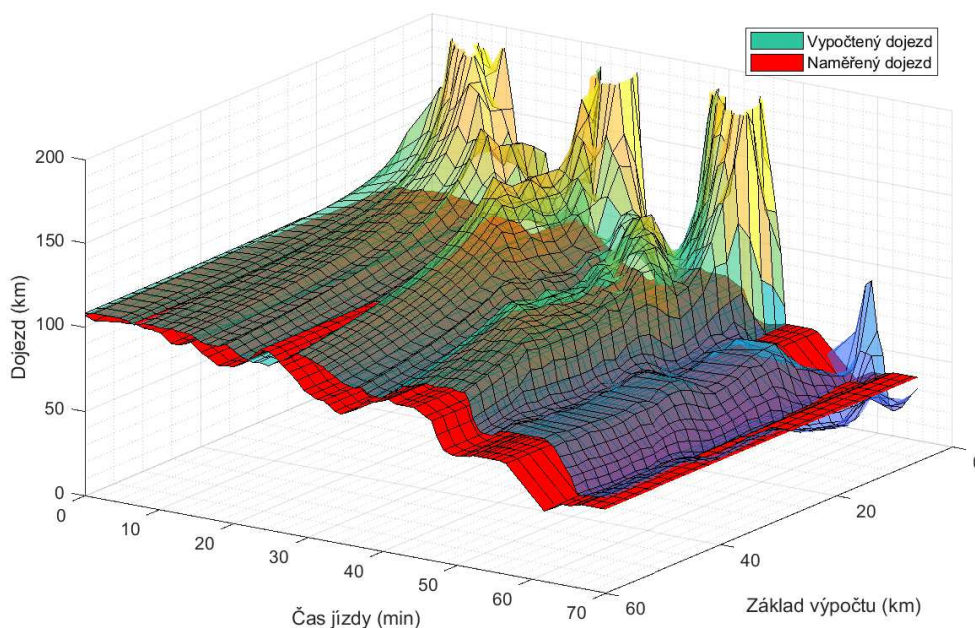
Obrázek 4.5: iOn: Rychlost a nadmořská výška v závislosti na čase.



Obrázek 4.6: iOn: Porovnání vypočítaného a měřeného dojezdu v závislosti na čase.



v jízdním režimu. Naopak zvýšení základu klouzavého průměru způsobí velké zpoždění a necitlivost při krátkodobých změnách jízdního režimu.



Obrázek 4.7: Leaf: Variace výpočtu dojezdu na základě změny parametru klouzavého průměru.

Z průběhu měřeného a vypočteného dojezdu je kromě změn velikosti hodnoty viditelné i zpoždění způsobené algoritmem klouzavého průměru. Odtud lze vyvodit závěr, že ačkoliv je změna hodnoty dojezdu podobná klouzavému průměru, není zřejmé, zda se tento výpočet používá v konkrétních modelech BEV. Na druhou stranu je jisté, že aktuální algoritmy nemají schopnost přesně určit hodnotu dojezdu. To znamená, že nevyužívají telemetrické údaje, které mají k dispozici, ani mapové podklady a predikce na plánované trase. Naopak, pokud jsou k dispozici data o modelu vozidla, telemetrická data a potenciál použít mapové podklady, nabízí se relativně jednoduché a efektivní řešení s potenciálem zpřesnit výpočet dojezdu.

Ve snaze o identifikaci bylo navrženo několik způsobů výpočtu zbývajících dojezdu BEV a tyto způsoby byly porovnány s reálnými daty naměřenými ve vozidle. Z jejich srovnání je patrné, že klouzavý průměr se v takto jednoduché variantě v testovaných BEV pro výpočet dojezdu nepočítá. Bylo rovněž ověřeno, že dojezd je počítán se značnou nepřesností a díky němu mohou nezkušení řidiči uvíznout na cestách. Pro další výzkum je nutno sestavit model BEV a vytvořit pokročilý algoritmus, který se bude schopen těmto nepřesnostem v co možná největší míře vyhnout.

## Kapitola 5

# Model dojezdu bateriového elektrického vozidla

Kapitola se zabývá teoretickým popisem faktorů ovlivňujících dojezd a sestavením modelu BEV. Po vypracování rešerše a provedeném vlastním výzkumu je zřejmé, že model BEV bude komplexní popis soustavy skládající se z desítek konstant, proměnných a rušení působících na soustavu. V první části kapitoly jsou analyzovány faktory působící na BEV a v následující části jsou popsány způsoby sestavení modelu, v závěru kapitoly je model pro BEV sestaven.

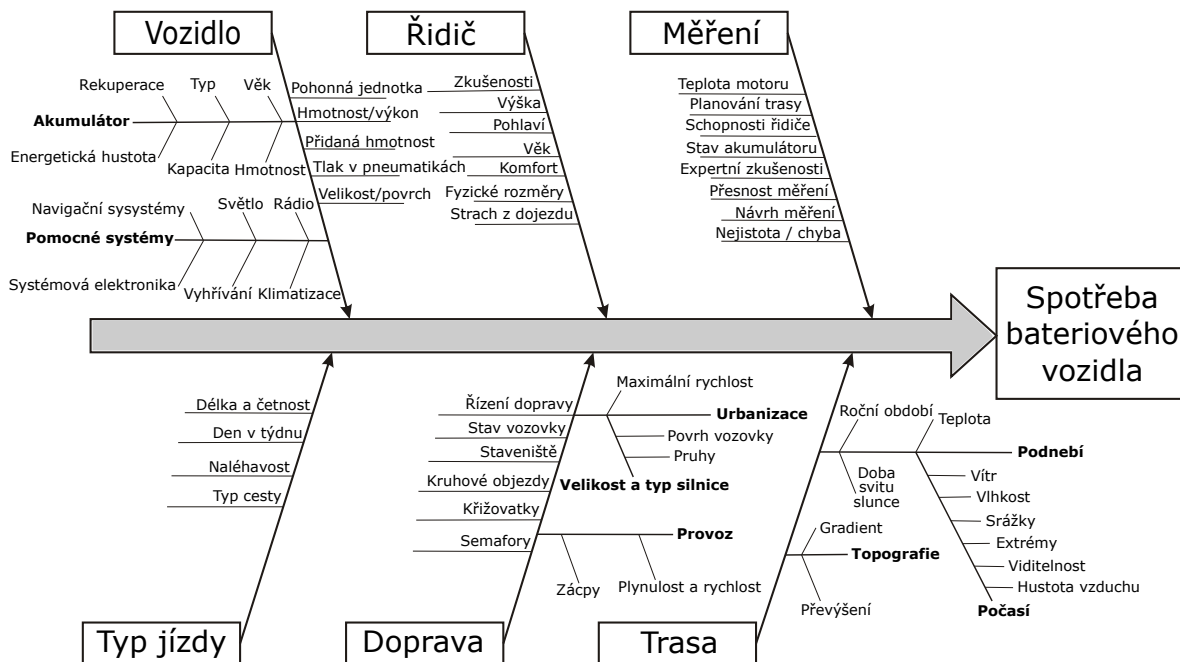
### 5.1 Faktory ovlivňující dojezd bateriového elektrického vozidla

Z nastudovaných zdrojů nejkompexnější závislost dojezdu BEV na vnějších vlivech uvedli autoři publikace (Li et al., 2016). Pomocí Išikawova diagramu v ní byl popsán vliv počasí, dopravy, akumulátoru, řidiče či samotného vozidla. Išikawův diagram pro BEV převzatý z této publikace je na obrázku 5.1.

V diagramu 5.1 ve větvi Vozidlo jsou stěžejní údaje BEV včetně typu trakčního akumulátoru a pasivní spotřeby – tyto údaje budou zakomponovány do modelu v rámci další kapitoly. V diagramu je zobrazeno mnoho netechnických parametrů. Zejména sociologické větve diagramu Typ jízdy a Řidič jsou špatně kvantifikovatelné.

Ve větvi Řidič jsou zmiňovány zkušenosti a strach z dojezdu. Cílem této práce je eliminovat potřebu expertní znalosti BEV k jeho každodennímu používání. Zkušenostmi může být méně také množství ujetých kilometrů. Zkušený řidič může křižovatku projet, protože ze svých zkušeností a z odhadu ví, že nikoho neomezí. Naopak nezkušený, nebo defenzivně jedoucí řidič toto neudělá, ve výhledu do křižovatky si zastaví a po zhodnocení situace se rozjede. Tento rozdíl z pohledu algoritmu přináší jeden energeticky náročný rozjezd navíc. Jestli komfort, věk a pohlaví ovlivňují spotřebu je diskutabilní. Ženy i muži mají jiné návyky a jiný jízdní styl. Ženy mají obecně potřebu vyšší tepelné pohody. To může vyžadovat větší příkon vyhřívání

vozidla, ale i tepelná pohoda závisí na mnoha faktorech a nelze ji kvantifikovat matematicky. Naopak dlouhodobá statistická data by mohla pomoci určit vliv na spotřebu BEV.



Obrázek 5.1: Diagram faktorů ovlivňujících spotřebu BEV. Převzato a přeloženo z publikace (Li et al., 2016)

Další podstatnou částí spotřeby BEV je větev Měření. Například měření energie v akumulátoru většinou probíhá metodou zvanou Coulomb counting. Ta při znalosti původní kapacity akumulátoru sčítá výkon v čase, a tím vyhodnocuje, kolik energie bylo dodáno nebo spotřebováno. Určení množství této energie je zatíženo chybou měření. Množství této energie je vypočteno v BMS a nikoliv měřeno uvnitř článku akumulátoru. Tato chyba narůstá při změně účinnosti uložení energie do článků například vlivem změny teploty. Ačkoliv moderní akumulátory měří teploty článků, nejsou schopny je měřit uvnitř článků, a za předpokladu dynamického tepelného děje zde vzniká chyba. Společně s bezpečnostními mechanismy každé BMS na základě kumulace této chyby dochází k jevu, kdy se omezuje SoH akumulátoru a tím maximální množství uložené energie. V důsledku těchto procesů má uživatel k dispozici méně energie pro pohyb, a tedy menší dojezd.

Posledními dvěma větvemi Išikawova diagramu jsou Doprava a Trasa. Obě skupiny parametrů záleží na externích datech. Doprava se soustředí na počet zastavení v křižovatkách, zpomalení na kruhových objezdech, aktuálních datech o hustotě provozu a objíždkách na plánované trase. Bere v potaz i povrch vozovky a maximální rychlost. Trasa zahrnuje rovněž převýšení a počasí, které spotřebu ovlivňuje velmi významně. Nejen teplota a srážky, ale rovněž samotná vlhkost může změnit dojezd v řádu jednotek procent. Naopak nižší viditelnost a

s tím spojené bezpečnostní snížení rychlosti, může vést k úspoře energie. Tato data je nutno získat z online služeb například Google, či Open street map.

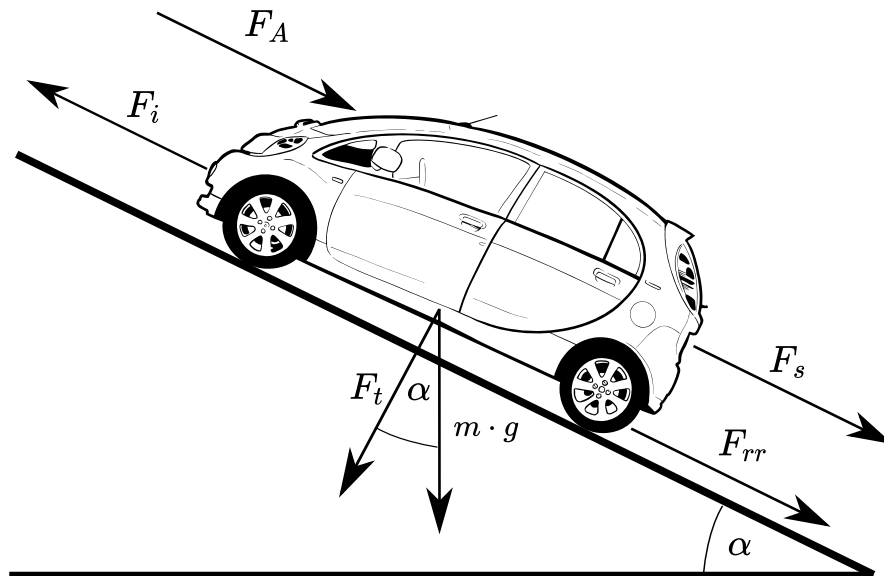
Problematika, kterou nelze zahrnout do tohoto diagramu je tzv. „Hill hazard“. Toto nebezpečí může vyústit ve vybití akumulátoru v kopcovitém terénu. Tato problematika je podrobně rozpracována v kapitole 6.3.

## 5.2 Možnosti sestavení modelu dojezdu bateriového elektrického vozidla

Jak vyplynulo z rešerše v kapitole 4.2 a z vlastních pokusů o identifikaci 4.3 k přesnému výpočtu dojezdu je potřeba přesný model BEV. V následujících kapitolách budou nastíněny nejběžnější možnosti sestavení modelu BEV a na jejich základě bude sestaven model BEV pro CMRE.

### 5.2.1 Matematický model

Jak bylo zjištěno v kapitole 4.2, většina vědeckých článků používá pro své výpočty dojezdu matematicko-fyzikální model, který popisuje síly působící na vozidlo rovnicí 5.1. Tyto síly jsou ilustrovány na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Situační schéma působení sil na vozidlo.

$$F_{tot} = F_i + F_s + F_{rr} + F_A, \quad (5.1)$$

kde  $F_{tot}$  je celková síla potřebná k pohybu vozidla v  $N$ ,

$F_i$  je síla potřebná pro změnu kinetické energie v  $N$ ,

$F_s$  je síla potřebná pro změnu potenciální energie v  $N$ ,

$F_{rr}$  je síla potřebná k překonání valivého odporu v  $N$ ,

a  $F_A$  je síla potřebná k překonání aerodynamického odporu v  $N$ .

Rovnice 5.1 lze rozložit na jednotlivé veličiny, jak popisuje rovnice 5.2:

$$F_{tot} = m_{tot} \cdot a + m_{tot} \cdot g \cdot \sin(\alpha) + C_{rr} \cdot m_{tot} \cdot g \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (5.2)$$

kde  $F_{tot}$  je celková síla potřebná k pohybu vozidla v  $N$ ,

$m_{tot}$  je celková hmotnost vozidla v  $kg$ ,

$a$  je jeho zrychlení v  $m \cdot s^{-2}$ ,

$g$  je tíhové zrychlení v  $m \cdot s^{-2}$ ,

$\alpha$  je úhel naklonění v  $rad$ ,

$C_{rr}$  je koeficient valivého odporu,

$C_d$  je koeficient aerodynamického odporu,

$A$  je čelní plocha v  $m^2$ ,

$\rho_{air}$  je hustota vzduchu v  $kg \cdot m^{-3}$ ,

a  $v$  je rychlost v  $m \cdot s^{-1}$ .

V těchto parametrech pro výpočet jsou obsaženy fyzikální konstanty. Ty se za určitých podmínek mění a jejich změna může vyvolávat chyby, které se promítnou do nepřesnosti algoritmu pro výpočet dojezdu BEV. Pro maximální přesnost algoritmů je potřeba tyto chyby identifikovat, vyhodnotit a v případě nezanedbatelného vlivu kompenzovat.

Změna hmotnosti nebo záměna letních pneumatik za zimní jsou jednoduše kvantifikovatelné a poměrně dobře měřitelné. Na druhou stranu bez mapových podkladů či GPS s měřením nadmořské výšky lze jen těžko kvantifikovat odchylku tíhového zrychlení. Ta se pohybuje od  $9,832 \text{ ms}^{-2}$  na pólech až po  $9,780 \text{ ms}^{-2}$  na rovníku a tento rozdíl může do výpočtu zanechat chybu až 1,8%. Podobný problém je u koeficientu valivého odporu, který se mění nejen s povrchem vozovky, ale také s vlhkostí a teplotou. V dešti nebo při souvislé pokrývce vodní vrstvou se koeficient valivého odporu zvyšuje, stejně jako síla potřebná k jeho překonání. Kniha (Wong, 1978) popsala podrobně výpočet koeficientu valivého odporu, ale také brzdění či smyku. Bez nepřesnosti není ani samotná rychlost. Ta totiž není pouze rychlostí vozidla, ale přičítá se k ní také rychlost a směr větru. Ten může výrazně snížit, ale také zvýšit spotřebu, obzvláště ve vysokých rychlostech. Konstantou zapříčinující největší nepřesnosti je hustota vzduchu. Ta závisí nejen na teplotě, ale rovněž na nadmořské výšce, atmosférickém tlaku a

vlhkosti. Už jen změna teploty z  $-25^{\circ}\text{C}$  na  $35^{\circ}\text{C}$  bez provázání do ostatních parametrů může způsobit chybu v odhadu dojezdu až 12 %.

Takto vypočtenou sílu je potřeba přepočíst na výkon a následně na energii potřebnou pro aplikaci této síly a pohybu vozidla. V této fázi výpočtu je nutno uvažovat účinnost soustavy. První ztráty vzniknou již na kolech vozidla. Nad rámec valivého odporu je zde několik parametrů ovlivňujících účinnost přenosu energie. Zejména celková sbíhavost kol může zásadně ovlivnit účinnost přenosu. Účinnost pevného převodu je ovlivněna pouze viskozitou olejové lázně a tím přeneseně teplotou. Účinnost elektrického motoru je ovlivněna teplotou, pracovním režimem a mechanickými vlastnostmi ložisek.

Nejsložitější je výpočet účinnosti výdeje energie z lithium-iontových článků. Jejich účinnost je závislá na teplotě, tlaku, pracovním bodě, stavu nabití (SoC), stavu zdraví (SoH), počtu cyklů aj. Článek umístěný u kraje akumulátoru bude lépe chlazen. Na každý článek bude působit jiný tlak. Při špičkovém odběru se ve velké hmotě článků dějí tepelné přechodové děje, které ovlivňují nejen živostnost, ale také účinnost akumulátoru jako celku. Ani knihy (Soylu, 2011-09-12) a (Ehsani, 2005), které jsou v oblasti modelování BEV mezi prostudovanými zdroji na špici, se těmito teplotními jevy nezabývají. Prostup tepla hmotou je jedním z nejsložitějších dějů vyžadujících užití složitých matematických nástrojů. Implementace těchto dějů je realizovatelná, ale vzhledem k tomu, že se ve většině případů bude jednat o maximálně jednotky procent celkové spotřeby energie, je často zanedbávána z důvodu své výpočetní náročnosti. Dalším spotřebičem, který je obtížně popsitelný matematicky, je HVAC, tedy vytápění, ventilace a klimatizace. Ve většině moderních BEV je tepelné čerpadlo, ve starších modelech PTC ohřev. V obou případech je teplo, a tedy elektrický příkon, regulováno dle teploty v kabině. Tato teplota se bude lišit nejen v závislosti na teplotě a vlhkosti okolního vzduchu, ale také na rychlosti vozidla a na počtu a stavu pasažérů ve vozidle. Samotný topný výkon je také závislý na vlhkosti, napětí trakčního akumulátoru a rychlosti. Obdobné parametry ovlivňují příkon klimatizačního systému. Vzhledem k tomu, že příkon PTC topení u Peugeotu iOn kolísá od 0 do 5,5 kW a akumulátor má v ideálním případě 16 kWh uložené energie, dokáže rozdíl v odhadu příkonu významně ovlivnit přesnost výpočtu dojezdu.

## 5.2.2 Datový model

Datový model pracuje s naměřenými nebo nasimulovanými hodnotami. Absenci přesných hodnot lze řešit interpolací známých dat. Výhodou tohoto přístupu je možnost identifikace procesů, pro které by bylo potřeba v případě matematického modelu složitých výpočtů. Identifikace soustavy se často používá v technické kybernetice pro soustavy, jejichž vnitřní popis nemůžeme efektivně vytvořit.

Jako příklad lze uvést lithium-iontový článek, jehož vstupem je dodaná energie a výstupem je poskytnutá energie. Tento článek je ovlivněn několika parametry, jedním z nejdůležitějších

je vnitřní impedance. Vnitřní impedance je závislá na několika vstupech (poruchových veličinách), například na teplotě a tlaku. Impedance je také závislá na proudovém zatížení. V praktickém nasazení takového článku v akumulátoru BEV bude záviset na poloze, zatížení, natočení, připojení na výkonové vodiče a také teplotách. Takto komplexní model lze identifikovat jako celek, tedy metodou černé skříňky. Již zkompletovaný akumulátor ve vozidle při konstantní teplotě můžeme vybíjet konstantním proudem, z čehož zjistíme kapacitu. Tento postup lze opakovat pro různé hodnoty proudů a zejména pro různé hodnoty teplot. Procedura rovněž odhalí, jak se projevuje vyšší impedance při nízkých teplotách na dynamice ohřevu článků vlastním ztrátovým výkonem. Postup lze zdokonalit v případě identifikace opakovatelným experimentem. Tedy ne v provozu, kdy se každá jízda fakticky liší, ale ve zkušebně s kontrolovaným prostředím. Toto je jeden z důvodů, proč existují zkušební cykly WLTP, EPA atp. Pochopitelně ani kontrolované prostředí stálost všech parametrů zcela nezajistí.

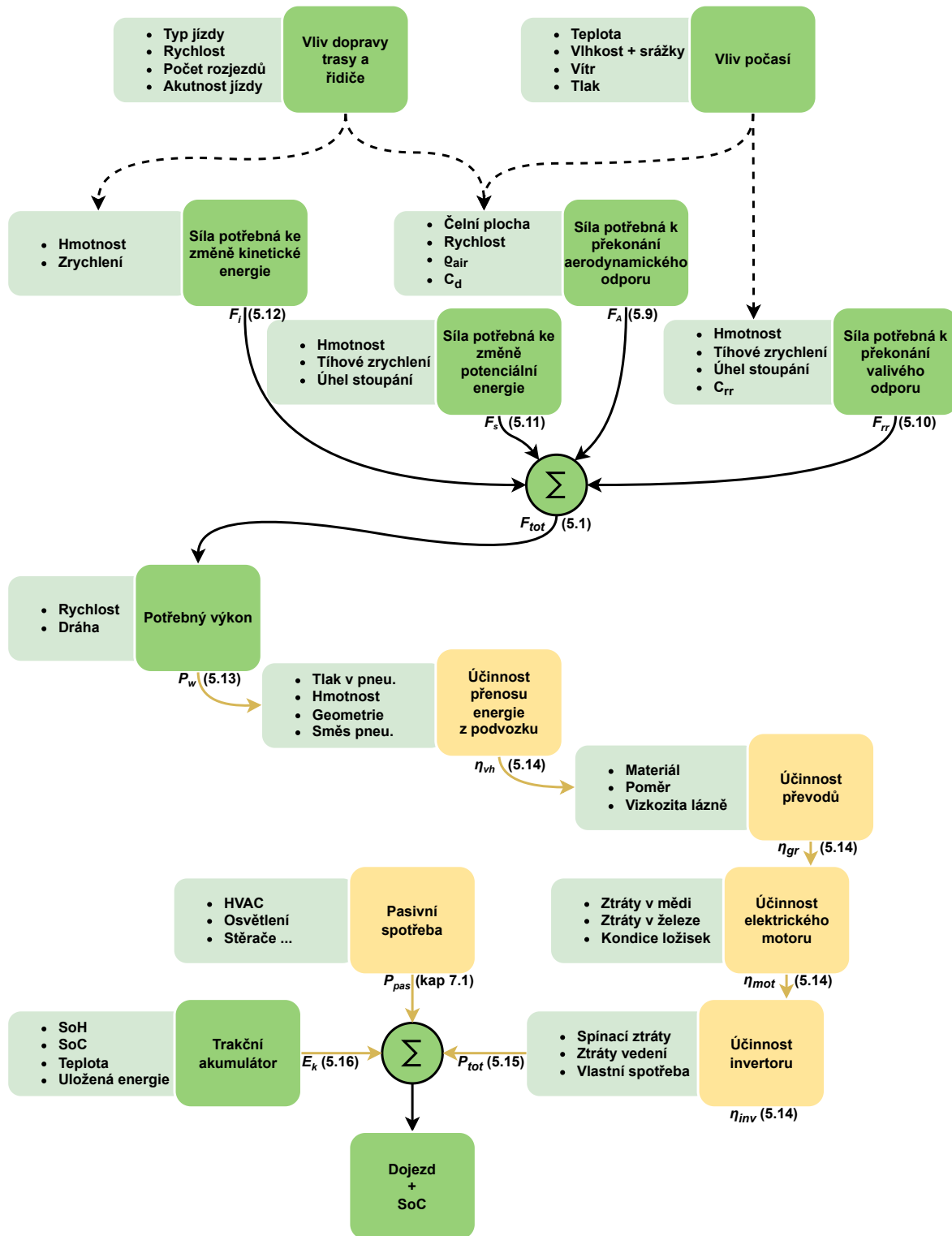
Identifikace a z ní plynoucí datový model je tedy účinným nástrojem pro popis chování. Při identifikaci je potřeba rozumět křížovým vazbám v soustavě a poruchovým veličinám působícím na soustavu. Například při pokusu o identifikaci spotřeby BEV v závislosti na přidané hmotnosti se nejen přímo ovlivňuje síla popsaná v rovnici 5.2, ale vlivem vyšší hmotnosti se rovněž zvyšuje tlak v pneumatikách, tím se mění jejich tvar, a z toho důvodu se mění valivý odpor. V závislosti na nahuštění kol se tak spotřeba může zvyšovat nebo snižovat. Při snaze o identifikaci je žádoucí potlačení křížových vazeb. V uvedeném příkladě by to byla úprava tlaku v pneumatikách při každé změně zátěže tak, aby se nezměnil valivý odpor a neovlivnil snahu o zachování konstantní hodnoty této veličiny.

### 5.3 Model BEV pro CMRE

Kombinace obou způsobů modelování je vhodná v případech, kdy některé části systému lze oddělit a identifikovat a jiné jsou těžce identifikovatelné, nebo jejich základní fyzikální principy mohou být jednoduše popsány, ale identifikace není možná kvůli významným křížovým vazbám.

Matematicko-fyzikálním modelem BEV lze popsat například sílu potřebnou k překonávání cesty viz rovnice 5.2. Naopak datového modelu lze s úspěchem využít při výpočtu pasivní spotřeby, nebo pro získání dat o účinnosti přenosu energie z akumulátoru na vozovku takzvaná TTW (tank-to-wheel efficiency).

Pro účely této práce byl sestaven model, jehož diagram je na obrázku 5.3. V horní části diagramu jsou zmíněny vlivy počasí a dopravy na základní fyzikální veličiny z rovnice 5.2. Tyto vlivy platí pouze za specifických okolností nebo různou měrou, a proto je jejich vliv označen přerušovanou čarou. V další části jsou síly, které je nutno překonat pro pohyb BEV. Započtením rychlosti se tato síla fyzikálně transformuje v potřebný výkon. Část tohoto výkonu se dále transformuje v teplo v podobě ztrát na kolech, v převodech, v elektrickém motoru



Obrázek 5.3: Původní model dojezdu BEV pro CMRE algoritmus.



a v elektrickém invertoru. Veškerá tato energie, tedy suma výkonu za čas, je odebrána z trakčního akumulátoru. Výpočtem potřeby energie pro pohyb a její snížení o ztráty spolu s pasivní spotřebou je možno určit dojezd a výsledné SoC v každém bodě trasy.

Z hlediska použití matematického nebo datového modelování jsou v diagramu 5.3 použity dvě barvy. Zelená označuje veličiny, které se v práci vypočítávají, a žlutá označuje identifikované soustavy. Žluté spojnice mezi žlutými bloky znamenají měření účinnosti bloků spojených dohromady. Například celý řetězec, od trakčního akumulátoru až po energii na kolech, je měřen jako jeden celek.

Pro výpočty základních sil z rovnice 5.1 je potřeba znát vlivy působící na proměnné rozepsané v rovnici 5.2.

Hmotnost vozidla  $m_{tot}$  lze zvážit a přidaná hmotnost posádky a nákladu zvážit nebo odhadnout. Zrychlení  $a$  je omezeno parametry vozidla, bezpečné jízdy a jeho průměrnou hodnotu jde odečíst z mapových podkladů. Úhel sklonu vozovky  $\alpha$  je podrobně zaznamenán v mapových podkladech, čelní plocha  $A$  a koeficient aerodynamického odporu  $C_d$  jsou pevně dány z výroby vozidla, mění se pouze pokud se na vozidle dělají dodatečné úpravy. Poslední veličinou s daným průběhem je rychlost vozidla. Její průměrná a maximální hodnota jsou zaznamenány v mapových podkladech a v dalších kapitolách bude předmětem optimalizace. V některých publikacích je vidět snaha o výpočet tzv. aplikované rychlosti, tedy o započtení rychlosti větru a jeho směru k rychlosti vozidla. Tento výpočet lze však s úspěchem nasadit pouze na překážkami nezkreslené trase.

Naopak veličiny, které se považují za konstantní jsou koeficient valivého odporu  $C_{rr}$ , tíhové zrychlení  $g$  a hustota vzduchu  $\rho_{air}$ .

Výpočtem koeficientu valivého odporu se zabývala kniha (Wong, 1978), a dle složitosti problematiky, je závislý na desítkách dynamicky neměřitelných parametrů. Tato kniha stanovila koeficient valivého odporu na 0,013 a rovněž diskutovala odchylky v běžných površích vozovky, které shrnula na 8 % tedy  $\pm 4$  %. Vzhledem k tomu, že tento model má sloužit pro výpočet dojezdu elektrických vozidel po běžných cestách na dálkových trasách, byl tento údaj převzat a použit.

Tíhové zrychlení  $g$  je závislé na poloze na referenčním elipsoidu země, tedy na zeměpisné délce a šířce nadmořské výšce. Ve skutečnosti se na většině referenčních elipsoidů počítá výška od nejnižšího suchého místa na planetě, tedy pobřeží mrtvého moře s nadmořskou výškou -420 m. Právě tyto parametry ovlivňující hodnotu tíhového zrychlení je možno určit pomocí modelů zemského elipsoidu. Nejčastěji používaný model zemského elipsoidu je WGS-84. Na jeho přesnost spoléhá mimo jiné i GPS navigace. Implementovat do modelu celý zemský elipsoid kvůli zlepšení přesnosti výpočtu dojezdu o maximálně 1,8 % se z pohledu doby trvání výpočtu těchto parametrů nevyplatí. Je však možno pomocí online nástrojů získat tuto informaci voláním API – aplikačních rozhraní nebo knihoven MATLABu. Hodnota  $g$  je tedy dosažená pomocí přesných dat z WGS-84.

Poměrně zásadní nepřesnost může vnést do výpočtu dálkových tras ve vyšších rychlostech hustota vzduchu  $\rho_{air}$ . Dle výpočtů v rámci přípravy pro článek (Dedek; Docekal et al., 2019) bylo zjištěno, že pouhou změnou teploty z 35 na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  se díky změně hustoty vzduchu může snížit dojezd BEV Peugeot iOn až o 12 %. Hustota vzduchu je v modelu pro CMRE vypočtena následovně.

Nejprve je nutno z atmosférického tlaku, udávaného pro výšku u hladiny moře, získat tlak v aktuální nadmořské výšce dle Barometrické rovnice 5.3,

$$p_h = p_0 \cdot e^{\frac{-g \cdot M_d \cdot (h - h_0)}{R \cdot t_K}}, \quad (5.3)$$

kde  $p_h$  je atmosférický tlak v dané výšce  $h$  nad mořskou hladinou  $h_0$  v  $m$ , v  $Pa$ ,

$p_0$  je tlak vztažený k hladině moře v  $Pa$ ,

$g$  je tíhové zrychlení v  $ms^{-2}$ ,

$M_d$  je molární hmotnost suchého vzduchu  $0.0289644\text{ }kg/mol$ ,

a  $t_K$  je teplota v  $K$ .

V reálných podmínkách je ve vzduchu obsažena i vlhkost a její přítomností se hustota vzduchu snižuje. V dalších krocích bude popsán výpočet podílu hustoty vzduchu nasyceného vodními parami.

Nejprve je potřeba vypočítat dle Tetensovi rovnice tlak vodních par nad vodou 5.4 nebo ledem 5.5,

$$p_{sat} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{17,27 \cdot t_C}{t_C + 237,3}}, \quad (5.4)$$

$$p_{sat} = 6,1078 \cdot 10^{\frac{21,875 \cdot t_C}{t_C + 265,5}}, \quad (5.5)$$

kde  $p_{sat}$  je tlak vodních par nad kapalinou nebo ledem v  $Pa$

a  $t_C$  je teplota ve  $^{\circ}\text{C}$ .

Při znalosti  $p_{sat}$  je možno vyjádřit tlak vodních par vztažených k relativní vlhkosti, a to rovnicí 5.6,

$$p_v = \frac{\phi}{100} \cdot p_{sat}, \quad (5.6)$$

kde  $p_v$  je tlak vodních par v  $Pa$ ,

$\phi$  je relativní vlhkost v %,

a  $p_{sat}$  je tlak v  $Pa$ .

Při znalosti tlaku vodních par  $p_v$  a celkového tlaku v zadané výšce  $p_h$  je možno vypočítat tlak suchého vzduchu rovnicí 5.7,

$$p_d = p_h - p_v, \quad (5.7)$$

kde  $p_d$  je tlak suchého vzduchu v  $Pa$ ,

$p_h$  je atmosferický tlak v dané výšce,

$p_v$  je tlak vodních par v  $Pa$ .

Nyní je možno vypočítat hustotu vlhkého vzduchu pomocí rovnice 5.8,

$$\rho_{air} = \frac{p_d \cdot M_d + p_v \cdot M_v}{R \cdot t_K}, \quad (5.8)$$

kde  $\rho_{air}$  je hustota vlhkého vzduchu v  $kg \cdot m^{-3}$ ,

$p_d$  je tlak suchého vzduchu vypočtený v rovnici 5.7 v  $Pa$ ,

$M_d$  je molární hmotnost suchého vzduchu  $0,0289644 kg/mol$ ,

$p_v$  je tlak vodních par vypočtený v rovnici 5.6 v  $Pa$ ,

a  $M_v$  je molární hmotnost vodních par  $0.018016 kg/mol$ .

Při znalosti rychlosti a hustoty vzduchu je možno vypočítat sílu potřebnou pro překonání odporu vzduchu 5.9,

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (5.9)$$

kde  $F_A$  je síla potřebná k překonání aerodynamického odporu v  $N$ ,

$C_d$  je koeficient aerodynamického odporu,

$A$  je čelní plocha v  $m^2$ ,

$\rho_{air}$  je hustota vzduchu v  $kg \cdot m^{-3}$ ,

a  $v$  je rychlost v  $m/s$ .

Při znalosti  $F_A$  je potřeba doplnit zbývající síly působící na vozidlo při pohybu. Jedná se o sílu potřebnou pro překonání valivého odporu 5.10, sílu potřebnou pro změnu potenciální energie 5.11 a sílu potřebnou pro změnu kinetické energie 5.12,

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot m_{tot} \cdot g \cdot \cos(\alpha), \quad (5.10)$$

$$F_s = m_{tot} \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (5.11)$$

kde  $F_{rr}$  je síla potřebná pro překonání valivého odporu v  $N$ ,

$F_s$  je síla potřebná pro změnu potenciální energie v  $N$ ,

$C_{rr}$  je koeficient valivého odporu,

$m_{tot}$  je celková hmotnost vozidla v  $kg$ ,

$g$  je tíhové zrychlení v  $ms^{-2}$

a  $\alpha$  je úhel náklonu ve  $^\circ$ .

$$F_i = m_{tot} \cdot a, \quad (5.12)$$

kde  $F_i$  je síla potřebná pro změnu kinetické energie v  $N$ ,

$m_{tot}$  je celková hmotnost vozidla v  $kg$

a  $a$  je zrychlení v  $ms^{-2}$ .

Ze získaných sil je vypočten výkon pomocí 5.13,

$$P_w = (F_{rr} + F_s + F_i + F_A) \cdot v \quad (5.13)$$

kde  $P_w$  je celkový idealizovaný výkon potřebný k pohybu ve  $W$ ,

$F$  jsou výše vypočítané síly v  $N$

a  $v$  je rychlost v  $m/s$ .

Idealizovaný výkon je veličina pro kinematickou soustavu BEV v ideálních podmínkách. V dalším kroku je potřeba započíst účinnosti jednotlivých komponent jak bylo popsáno v obrázku 5.3. Celková účinnost  $\eta$  je vyjádřena rovnicí 5.14.

$$\eta = \eta_{vh} \cdot \eta_{gr} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{inv}, \quad (5.14)$$

kde  $\eta$  je účinnost přenosu výkonu TTW (viz kapitola 7.2),

$\eta_{vh}$  je účinnost přenosu výkonu z podvozku,

$\eta_{gr}$  je účinnost převodů,

$\eta_{mot}$  je účinnost elektrického motoru,

a  $\eta_{inv}$  je účinnost invertoru.

Ze znalosti TTW účinnosti  $\eta$  a potřebného výkonu pro pohyb  $P_w$  je možno vypočíst celkový výkon rovnicí 5.15.

$$P_{mov} = \frac{P_w}{\eta}, \quad (5.15)$$

kde  $P_{mov}$  je celkový výkon potřebný k pohybu BEV ve  $W$ ,

Suma výkonu potřebného pro pohyb společně s příkonem pasivních spotřebičů v čase je spotřebou energie z trakčního akumulátoru. Pokud tedy díky modelu BEV známe potřebný výkon  $P_{mov}$  na zvolené trase v každém okamžiku, identifikujeme pasivní spotřebu (viz kapitola 7.1) a známe uloženou energii v trakčním akumulátoru, jsme schopni vypočíst zbývající uloženou energii v trakčním akumulátoru v každém bodě trasy, jak popisuje rovnice 5.16.

$$E_k = E_0 - \left( \sum_{i=0}^k P_{mov} + \sum_{i=0}^k P_{pas} \right) \cdot t, \quad (5.16)$$

kde  $E_k$  je zbývající energie v trakčním akumulátoru ve  $Wh$  ve zvoleném bodě  $k$ ,

$E_0$  je uložená energie v trakčním akumulátoru na počátku trasy ve  $Wh$ ,

$P_{mov}$  jsou výše zmíněné výpočty výkonu potřebného pro pohyb vozidla ve  $W$ ,

$P_{pas}$  jsou hodnoty pasivního výkonu vozidla ve  $W$ ,

$i$  je iterace výpočtu od počátku trasy až po zvolený bod  $k$

a  $t$  je čas potřebný k ujetí počítaného úseku trasy v  $s$ .

Vzhledem k tomu, že výpočty účinnosti TTW  $\eta$  a pasivní spotřeby  $P_{pas}$  jsou striktně vázány ke konkrétnímu modelu BEV, budou dále rozvíjeny v kapitole 7. Poslední veličina, kterou lze obecně popsat je uložená energie  $E_0$ . I tento výpočet lze modifikovat pro různá řazení článků. Následující výpočet je vztažen pro 1S-(NoC)P řazení, tedy pouze sériově řazené články.

Nejprve je potřeba znát parametry sekundárního článku, tedy základní jednotky trakčního akumulátoru a konfiguraci trakčního akumulátoru. Mezi tyto parametry patří:

- Aktuální kapacita článku.
- Nominální napětí článku.
- Počet článků v trakčním akumulátoru.
- Aktuální stav nabití (SoC).

Některá vozidla poskytují informaci o aktuální kapacitě článků pomocí parametru SoH, tedy zdraví článků, a tedy i trakčního akumulátoru jako celku tedy SoH. Z parametru SoH a znalosti nominální kapacity článku lze vypočítat aktuální kapacitu článku pomocí rovnice 5.17.

$$C_{act} = \frac{SoH}{100} \cdot C_{nom}, \quad (5.17)$$

kde  $C_{act}$  je aktuální kapacita článků  $Ah$ ,

$SoH$  je aktuální zdraví článků a trakčního akumulátoru v %

a  $C_{nom}$  je nominální kapacita článků v  $Ah$ .

Dále je potřeba vypočítat celkové nominální napětí trakčního akumulátoru pomocí rovnice 5.18.

$$Un_{aku} = Un_{cell} \cdot NoC_{aku}, \quad (5.18)$$

kde  $Un_{aku}$  je nominální napětí trakčního akumulátoru ve  $V$ ,

$Un_{cell}$  je nominální napětí článku ve  $V$

a  $NoC_{aku}$  je počet článků v akumulátoru.

Maximální dosažitelnou uloženou energii je tak možno popsat rovnicí 5.19.

$$E_{max} = C_{act} \cdot U_{naku}, \quad (5.19)$$

kde  $E_{max}$  je maximální uložená energie ve  $Wh$  zohledňujíc zdraví akumulátoru,

$C_{act}$  je aktuální kapacita článků  $Ah$

a  $U_{naku}$  je nominální napětí trakčního akumulátoru ve  $V$ .

Aktuální dostupnou energii je možno získat po vypočítání rovnice 5.20.

$$E_{act} = \frac{SoC}{100} \cdot E_{max}, \quad (5.20)$$

kde  $E_{act}$  je aktuálně uložená energie ve  $Wh$  zohledňujíc zdraví akumulátoru,

$SoC$  je aktuální nabití článků a trakčního akumulátoru v %

a  $E_{max}$  je maximální uložená energie ve  $Wh$ .

Pro doplnění modelu je potřeba znát parametry dobíjení. Jak bylo řečeno v kapitole 3, většina BEV má možnost jak střídavého, tak stejnosměrného dobíjení. Zatímco výkony střídavého dobíjení se pohybují od 660 W do 43 kW, dle instalované palubní nabíječky. Výkony stejnosměrných stanic se pohybují od 20 kW do 350 kW dle dobíjecí stanice a rezervovaného sdíleného příkonu. Dle způsobu dobíjení lze vypočíst čas dobíjení, maximální hodnotu SoC, ztráty při dobíjení a v neposlední řadě také ekonomickou a ekologicky stránku dobití. Pro správnou funkci algoritmu, který je schopen plánovat delší trasy, včetně dobíjení u stanic, je potřeba tyto parametry znát a ideálně také ve spolupráci s online API ověřovat funkčnost a obsazenost stanic. Jen tak lze úspěšně optimalizovat delší trasy na celkový strávený čas, spotřebovanou energii nebo ujeté kilometry. Hodnoty dobíjecích výkonů a časů závisí na typu vozidla, jeho aktuálním stavu, dobíjecí stanice a dostupností výkonů. Tato data nelze přesně kvantifikovat pro obecný model a podobně jako pasivní spotřeba nebo TTW účinnost jsou předmětem měření.

V této kapitole byl sestaven obecný model výpočtu dojezdu BEV pro CMRE. V další části je potřeba datově analyzovat a nastavit pro konkrétní BEV a konkrétní situaci provozu (přidaná hmotnost, použité pneumatiky a podobně). Pro správný běh CMRE je potřeba dále implementovat model počasí a model trasy (mapové podklady, aktuální dopravní situace). Implementací těchto dat a doplněním zmíněných modelů se zabývá kapitola 7.

## Kapitola 6

# Návrh algoritmu zpřesňujícího výpočet dojezdu

Z rešerše sociologických potíží s adopcí BEV v kapitole 3 vyplývá, že pro potřeby překonání strachu z dojezdu je potřeba mít algoritmus, který umožní s vysokou přesností vypočítat dojezd v každém bodě překonané trasy. To lze realizovat pouze při znalosti chování BEV (jeho modelu), počasí a plánované trasy. V této kapitole bude objasněna principiální funkcionality navrženého algoritmu a nastíněna možnost optimalizace trasy pomocí navrženého algoritmu.

### 6.1 Přístupy k návrhu výpočtu dojezdu

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem výstupu algoritmů pro výpočet dojezdu je zobrazování údaje dojezdu pomocí rozhraní řidiče. Toto dnes zvládá většina BEV ale i ICE vozidel. Tento údaj je pro řidiče zcela nezávazný. Mezistupněm mezi plnou autonomií řízení a řízením vozidla řidičem je schopnost řízení toků energií na základě vypočteného dojezdu a naplánované trasy.

V kapitole 4.3 v tabulce 4.1 byl popsán případ, kde i přes avizovaný téměř dvojnásobný dojezd v relaci se vzdáleností k cíli vozidlo do destinace nedojelo. Pokud by se na trase řidič choval hospodárněji, vozidlo by do cíle dorazilo. Nabízí se dvě možnosti využití navrhovaného algoritmu: Buď skrze displej řidiče upozornit, že je ohrožen dojezd do cíle, a navrhnout řešení, například snížit rychlost, zapnout hospodárnější režim (ten zpravidla sníží akceleraci, rychlost a zvýší rekuperační síly), nebo omezit zbytná zařízení jako je HVAC. Druhou možností je, aby systém s navrhovaným algoritmem přímo tyto změny provedl. Díky včasnému zásahu by změny nemusely být radikální a většinou by se týkaly pouze zmíněného omezení akcelerace a maximální rychlosti o pár procent. Takové limitace by řidič ani nemusel registrovat. Tento zásah by vždy musel vyhodnocovat bezpečnost provedených změn s ohledem na dynamiku vozidla a zákonné limity minimální rychlosti.

Další možností je použít tyto algoritmy pro interní řízení toků energií. Takové algoritmy byly zkoumány v (Yu et al., 2016), (Poramapojana et al., 2012) a (Shankar et al., 2013) pracích na hybridních vozidlech (HEV) a díky mapovým podkladům a modelu bylo dosaženo úspory pohonných hmot. Pro plně elektrické bateriové vozidlo přichází takovýto algoritmus v úvahu pouze v situaci, kdy je BEV vybaveno kombinací superkapacitorů a baterií sekundárních článků. Bohužel tato kombinace je v praxi komerčně nerealizovatelná. Vlivem špatného poměru uložené energie ku objemu je baterie superkapacitorů pro takovou aplikaci velmi objemná. V posledních letech se vlivem technologického pokroku smazává rozdíl mezi účinností uložení elektrické energie do superkapacitorů a sekundárních článků. Účinnost regenerace je rovněž dána mechanickým limitem, tedy schopností přenést záporný moment bez prokluzu kol. Více energie není možno přenášet z jiných důvodů, než je účinnost dobíjení sekundárních článků.

Poslední a pro autonomní řízení nejpotřebnější možností využití navrhovaného systému je jeho zapojení do plné autonomie vozidla. Plánování trasy, sledování provozu, počasí, stavu EV, schopnosti nalézt u dlouhých tras dobíjecí místa a optimalizovat trasu tak, aby dobíjení bylo co nejúčinnější a cesta co nejkratší, nejrychlejší nebo nejúspornější je základním předpokladem pro plnou autonomii vozidel.

## 6.2 Přístupy k návrhu řízení toku energií

Za předpokladu dostatečně přesného modelu soustavy BEV a za předpokladu, že systém má možnost bezpečným způsobem omezovat spotřebu vozidla, lze uvažovat nad následující funkcionalitou. Řidič-uživatel nasedne do BEV, vybaveného tímto systémem a zadá cíl požadované trasy. Po zpracování všech potřebných údajů mohou nastat tři situace.

1. Vozidlo je zadanou trasu schopno překonat bez omezení.
2. Vozidlo je zadanou trasu schopno překonat s jistou limitací.
3. S vozidlem není možno zadanou trasu ujet bez dobíjení na trase.

1. varianta je pro počáteční fázi algoritmu realizovatelná bez nutných optimalizačních výpočtů. U bodu 2 je potřeba zvážit, jak velká musejí být omezení, aby se do cíle dalo dojet, a zda není časově výhodnější (v případě, že by se v rámci omezení snižovala rychlost) upustit od limitací a naplánovat krátké dobíjení na trase, pakliže to charakter trasy umožňuje. V bodě 3 by měl algoritmus v rámci komfortu řidiče nabídnout rozdělení trasy a vybrat možná místa dobíjení.



## 6.3 Hill Hazard

Hill hazard (přeloženo jako „riziko kopce“) je situace, která může vzniknout pouze u BEV a HEV, které jsou vybaveny rekuperační energií. Zatímco vozidla se spalovacím motorem nejsou schopna jízdu z kopce, tedy změnu potenciální energie, nikterak zužitkovat, vozidla s elektromotorem mohou změnu potenciální energie přeměnit na elektrickou energii, tu pak mohou uložit do trakčního akumulátoru a využít později. Tato výhoda klade zvýšené nároky na vývoj algoritmů. U ICE vozidel lze předpokládat, že pokud algoritmus vypočte spotřebu PHM na zvolené trase například 10 litrů, tak pokud máme v nádrži vozidla alespoň toto množství, dojedeme do cíle. U BEV toto neplatí v případech, kdy se na trase vyskytují velká převýšení.

Pokud by řidič BEV stál před horou, kterou by musel překonat a algoritmus výpočtu by spočetl pouze zbývající energii v cíli, tedy při úpatí hory, řidič by velmi pravděpodobně zůstal uvězněný před vrcholem hory s vybitým akumulátorem. Správným postupem algoritmu je vypočítat, zdali se uložená energie v trakčním akumulátoru v každém bodě trasy neblíží hranici vybití vozidla. Pokud tato situace na trase nastane, nazývá se Hill Hazard. V tom případě musí algoritmus zavést opatření, aby tato situace nenastala. Opatřením může být úspora energie na trase (řízení toků energií) nebo doporučení nabíjení po trase.

## 6.4 Vlastní algoritmus

Na základě předchozího výzkumu a objevování pozitiv a negativ metod moderní teorie řízení byl navržen a realizován vlastní algoritmus s názvem Cyclic Multimodel Range Estimation (CMRE). Ten načte vstupní data z modelu BEV, vstupu uživatele, předpovědi počasí na trase a mapových podkladů. Z nich vypočítá dojezd a vyhodnotí situaci. Výsledky prezentovány řidiči mohou být následující:

1. Dojezd do cíle bez omezení.
  - (a) Průměrnou rychlostí ostatních účastníků na trase (z mapových podkladů).
  - (b) Maximální dovolenou rychlostí vozidla a trasy.
2. Dojezd za současných podmínek není možný.
  - (a) Možnost výběru dobíjecí stanice po trase.
  - (b) Pokud se vozidlo právě dobíjí, výpočet SoC potřebného k možnému dojezdu do cíle.
3. Dojezd do cíle pouze s omezeními.
  - (a) Omezení rychlosti.

- (b) Omezení akcelerace.
- (c) Omezení pasivní spotřeby.
- (d) Omezení dobíjení palubní baterie.

První bod bude uživateli pouze prezentovat SoC a spotřebovanou energii v cíli. Na tyto hodnoty lze navázat i výpočet ceny, průměrné spotřeby, potenciální úspory času při maximální rychlosti atd.

Druhý bod nabídne řidiči volbu dobíjecích stanic na trase, po zvolení stanice rozdělí celou trasu na dvě části a zopakuje algoritmus pro každou část zvlášť. Z výsledných dat může optimalizovat čas strávený na dobíjecí stanici. Pokud je vozidlo v okamžiku výpočtu trasy dobíjeno a akumulátor není nabit plně, algoritmus vypočte, zda a při jakém SoC je možno zvolenou trasu ujet bez zastávky.

Třetí bod je z pohledu algoritmu nejsložitější. Nabízí možnost prodloužení dojezdu řízením toku energií. A to nejen při počátečním plánování trasy, ale zejména pokud se na trase změň podmínky například vlivem nepřesné předpovědi počasí nebo nenadálé objížďky.

V praktickém nasazení jde o jistá omezení výkonu. V případě omezení maximální rychlosti zásadně klesá spotřeba, zejména na dálnici, jelikož potřebný výkon je funkcí rychlosti a v případě aerodynamického odporu dokonce funkcí kubickou. V případě omezení akcelerace nelze úsporu hledat v základním popisu modelu. Potřebný výkon je totiž lineární funkcí akcelerace. Nelineární závislost se projevuje až v elektrických systémech, kdy výkonové ztráty rostou s druhou mocninou proudu. Jelikož zrychlení je dáno momentem a moment je funkcí proudu, je jasné, že vyšší zrychlení vede ke kvadratickému zvýšení ztrát.

Dalším omezením vedoucím k úspoře energie je omezení dobíjení palubního akumulátoru. Všechna elektrická vozidla kromě trakčního akumulátoru mají rovněž 12V olověný akumulátor. Ten napájí veškeré systémy kromě vyhřívání, klimatizace a energie pro pohyb. Energie v něm je doplňována při každém dobíjení střídavou nebo stejnosměrnou dobíjecí stanicí, ale také celou dobu inicializovaného<sup>1</sup> vozidla. Dobíjení 12V akumulátoru za jízdy je do jisté míry ztrátou energie, zejména při nízké účinnosti palubního dobíjení. Při naplánované trase s dobíjením na jejím konci a znalostmi o počasí, čase a geografii lze poměrně přesně odhadnout energii potřebnou pro palubní systémy. Trakční akumulátor je schopen dobíjet palubní akumulátor, i když již není bezpečné z něj čerpat energii pro pohyb vozidla.

Posledním z úsporných opatření je omezení pasivní spotřeby. Pasivní spotřeba závisí na čase. Největším podílem na spotřebě jsou systémy HVAC, tedy topení, ventilace a klimatizace. Dalšími spotřebiči s vysokým příkonem jsou světlomety, přímé vyhřívání oken a elektrický posilovač brzd. Ty nelze omezovat z důvodu bezpečnosti. Implementací novějších a účinnějších tepelných čerpadel spolu s využíváním odpadního tepla z motorů a akumulátoru klesá příkon spotřebičů používaných pro vytápění. Vzhledem k povaze ostatních omezení lze předpokládat,

---

<sup>1</sup>O bateriových vozidlech nelze říci, že jsou nastartovaná.

že se doba jízdy a z toho plynoucí spotřeba HVAC prodlouží. Omezení pasivní spotřeby může obětovat tepelný komfort posádky výměnou za dosažení cíle.

Zatímco omezení maximální rychlosti a zrychlení může být prováděno běžně, snižování příkonu HVAC nebo omezování dodávky energie do palubního akumulátoru je podstupování jistého rizika. Není doporučeno s těmito omezeními počítat již od začátku trasy. Mohou posloužit jako nouzová rezerva. Například pro Peugeot iOn může vypnutí dobíjení palubního akumulátoru znamenat 4% úsporu energie<sup>2</sup>. To prodlouží dojezd o cca 5 km, což může znamenat rozdíl mezi uvíznutím v nepřehledném úseku na silnici a dojezdem do cíle.

Výsledný algoritmus byl sestaven a jeho funkcionality byla motivována absolvovanými kurzy teorie řízení v rámci magisterského studia a moderní teorie řízení v rámci doktorského studia. Využívá model, který byl sestaven na základě expertních znalostí a jednoduchý stavový automat pro rozhodovací sekvenci. V oblasti řízení toků energií používá P regulátory, jejichž užití bylo motivováno nastavováním vah v LMS. Algoritmus kromě úvodního plánování trasy výpočet cyklicky opakuje během jízdy, čímž (podobně jako MPC) reaguje na pomalu se měnící poruchy a je schopen menšími zásahy do spotřeby ušetřit dostatek energie pro bezpečný příjezd do destinace.

V návaznosti na výpočet tohoto algoritmu je možno provádět výpočty pro více tras a jejich srovnáváním najít optimální možnost dle žádaného kritéria.

## 6.5 Možnosti optimalizace

Většina uživatelů automobilů se nechce v rychlosti omezovat, naopak limity dané zákonem překračují. Případné omezení rychlosti, zrychlení nebo pohodlí by pro ně bylo neúnosné. Z těchto důvodů se nabízí možnost optimalizace trasy. Trasu lze optimalizovat dle kritérií:

1. Celkového času na trase.
2. Času řízení.
3. Spotřebované energie.
4. Nejkratší trasy.

Ještě před několika lety navigace nabízely volbu nejkratší nebo nejrychlejší trasy. V posledních letech tato možnost volby z navigací mizí a trasa je optimalizována pouze na celkový čas.

K BEV je nutno přistupovat jinak. Pokud řidič spěchá, a chce být v cíli co možná nejdříve, volí nejrychlejší trasu, tedy optimalizaci na celkový čas. V této části je možno využít omezení

---

<sup>2</sup>Více informací o výpočtu v kapitole 7.1.

z předchozí kapitoly, a díky ušetřené energii se vyhnout dobíjení na trase. Dobíjení na trase může co do časové náročnosti převýšit čas ztracený vlivem nižší rychlosti.

Pokud může řidič efektivně využít čas při dobíjení, je možno optimalizovat čas řízení. Řidič v tomto případě pojedě neúspěšně, maximální dovolenou rychlostí, a v době, kdy vozidlo bude dobíjet, může pracovat nebo se občerstvovat. Ve chvíli, kdy v akumulátoru bude dostatek energie pro dosažení cíle trasy maximální rychlostí včetně zvolené rezervy, řidič bude pokračovat dále. Celkový čas za volantem bude kratší, ale celkový čas na trase bude velmi pravděpodobně delší.

Další možností optimalizace je minimalizace vynaložené energie. Tato možnost je využitelná, pokud existuje do cíle více cest, podobných vzdáleností a průjezdným časem. Pravděpodobně bude v budoucnu často využívána z důvodu zvyšujících se cen elektrické energie. Dalším scénářem pro výpočet této optimalizace je nejistota možnosti dobití v destinaci. V takovém případě je vhodné energii v akumulátoru šetřit.

Poslední možností je optimalizace trasy dle kritéria nejkratší vzdálenosti. To bylo v minulosti považováno za náhradu úsporné trasy. V tomto algoritmu, kdy máme plnohodnotný výpočet energie, lze pro nejkratší trasu najít několik uplatnění. Prvním je jakákoliv aplikace, kde je fixní cena za kilometr, ať už se jedná o taxislužbu, služební vozidla nebo rozvážkové služby. Další aplikací této optimalizace může být dlouhodobá snaha o minimalizaci nájezdu z důvodu servisních intervalů nebo z důvodu nižších poplatků za pojištění.

## Kapitola 7

# Realizace původního CMRE algoritmu

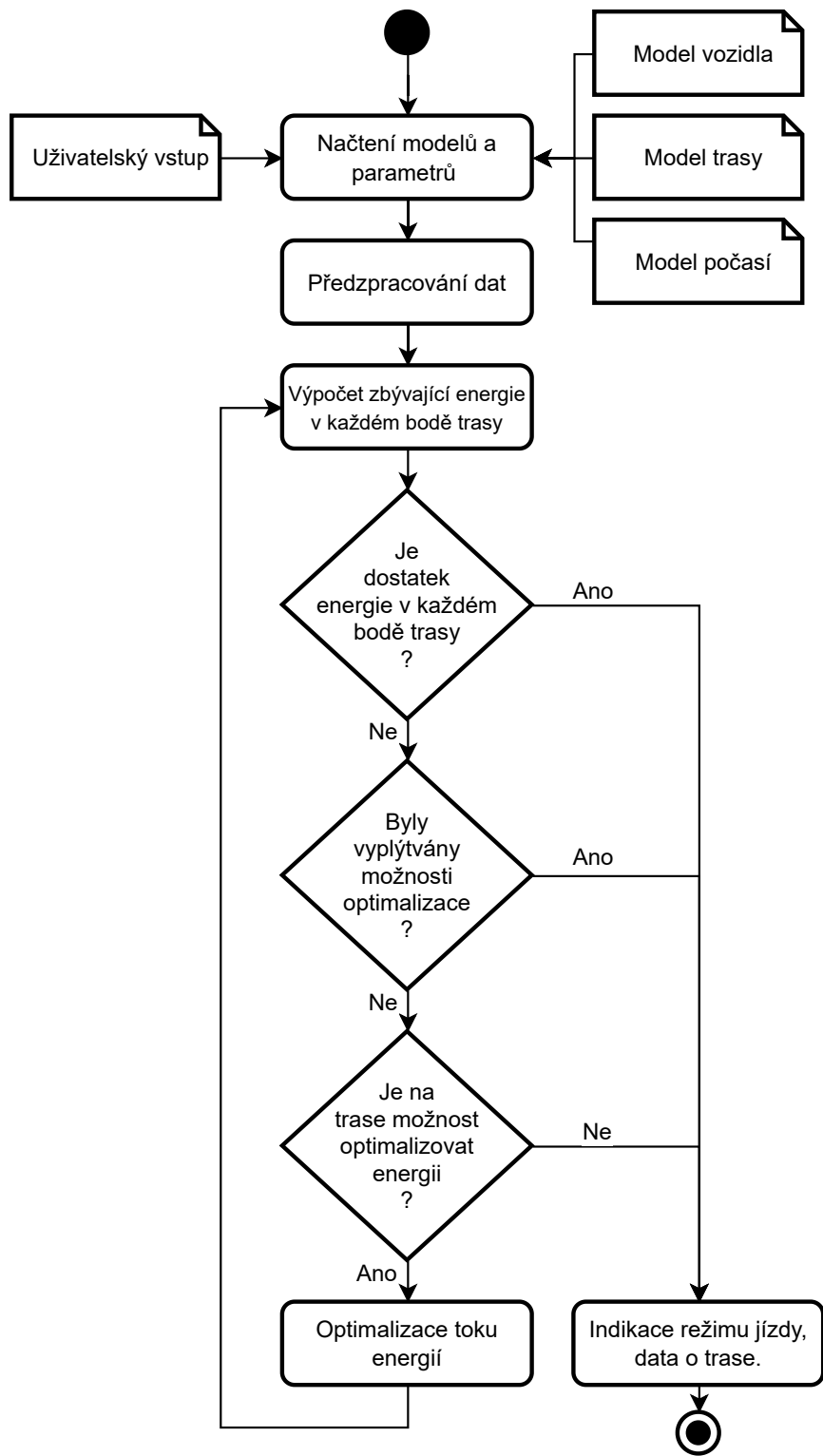
V této kapitole bude popsán sestavený algoritmus CMRE. Název vznikl z anglické zkratky *Cyclic Multimodel Range Estimation*. CMRE se zakládá na kombinovaném modelu z kapitoly 5 a poznacích z kapitoly 6.

V úvodu kapitoly jsou prezentovány výsledky měření dat pro řešení částí modelu z kapitoly 5 a to pasivní spotřeby vozu a účinnosti přenosu energie z nádrže na kola (Tank to Wheel efficiency – TTW). Dále je popsán způsob získání dat z mapových podkladů pomocí vytvořeného programu Speedgetter. Další část kapitoly popisuje předzpracování dat a jádro výpočtu algoritmu. Následuje prezentace výsledků výpočtu. V další části kapitoly je zpracována analýza kritických míst algoritmu. Poslední část kapitoly se věnuje příkladu optimalizace pomocí výstupů z CMRE algoritmu. Náhled principiální funkce CMRE algoritmu je na obrázku 7.1.

V tomto místě práce snaha o maximální univerzálnost modelu a algoritmu končí. Identifikace pasivní spotřeby, účinnosti TTW a další specifická data vyžadují konkrétní model vozidla. Pro disertační práci bylo zakoupeno BEV do osobního vlastnictví. Pokud nebude popsáno jinak, veškeré hodnoty v této kapitole se vztahují k vozidlu Peugeot iOn r.v. 2012 (EV-databaze, 2019b).

### 7.1 Měření pasivní spotřeby

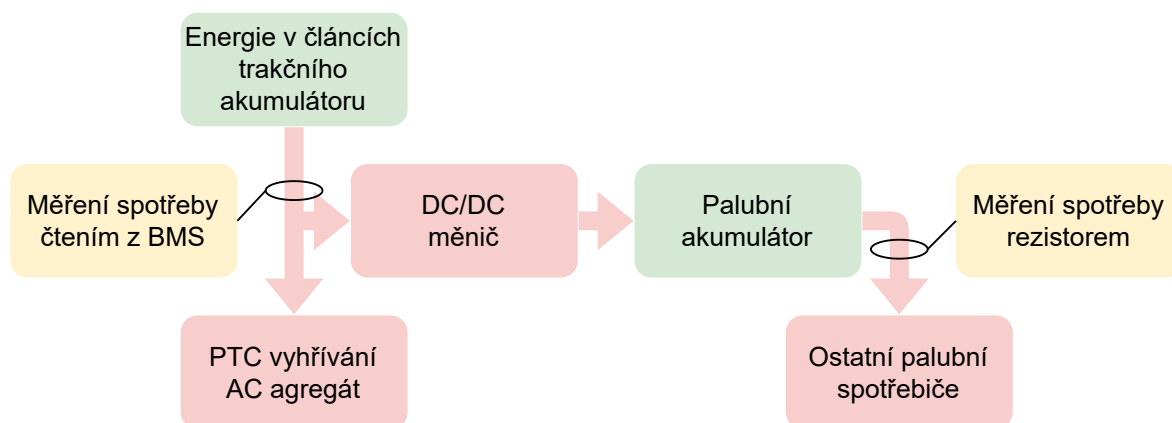
Pasivní spotřeba je příkon BEV, který závisí na čase a používaných spotřebičích, nikoliv na ujetých kilometrech. Tato spotřeba zahrnuje provoz řídicí elektroniky, osvětlení vozidla, stěrače, ostříkovače, podtlaková čerpadla vykonávající funkci posilovače brzd či řízení a mnoho dalších. Spotřebičem s nejvyšší spotřebou jsou systémy HVAC, tedy elektrické vytápění, ventilace a klimatizace. PTC topení může nárazově dosáhnout příkonu až 4,5 kW, společně s ventilací se krátkodobě příkon může pohybovat přes 5 kW.



Obrázek 7.1: Schéma CMRE algoritmu.

Pasivní spotřeba výrazně ovlivňuje dojezd. Uložená energie v novém plně nabitém trakčním akumulátoru by byla dle specifikace výrobce 16 kWh (320 V, 50 Ah). Vzhledem k malé kapacitě článků a požadavkům na vysoké výkony (2,5 C pro dobíjení a až 3 C pro vybíjení) je jejich degradace v čase značná. Aktuální SoH je 89,6 %. Celková uložená energie je tedy přibližně 13 kWh. Příkon HVAC, osvětlení a elektroniky může dle zdroje (Wager et al., 2016) dosahovat až 5,5 kW/h a spotřebovat přes 40 % energie uložené v trakčním akumulátoru. Při průměrné spotřebě 12 kWh/100km a při rychlosti 90 km/h dojede vozidlo přibližně 108 km na jedno nabití. Při přidání maximální hodnoty pasivní spotřeby ujede vozidlo necelých 68 km. Z důvodu velkého rozdílu spotřeb při rozdílném nastavení spotřebičů je přesná predikce pasivní spotřeby zásadní složkou výpočtu dojezdu. Ze stejných důvodů vzešla potřeba přesného měření příkonu jednotlivých spotřebičů BEV.

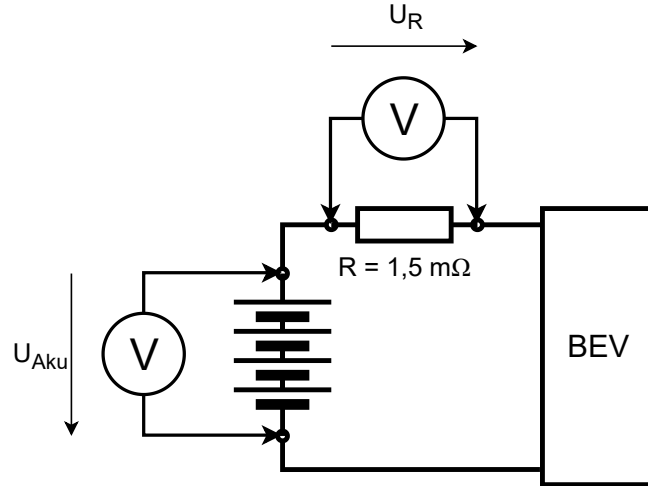
Měření bylo realizováno dvěma metodami. Nejprve nepřímou metodou, měřením úbytku napětí na rezistoru zapojeném do série se zátěží. Druhou metodou je přímý odečet hodnot z BMS trakčního akumulátoru. Srovnáním těchto metod je možno vyhodnotit účinnost DC/DC měniče sloužícího jako palubní dobíječka 12V palubního akumulátoru. Obě popsané metody a schéma toků energií je popsáno obrázkem 7.2. Zelená barva označuje místa s možností uložení energie, žlutá měřicí bloky a červená systémy spotřebovávající energii.



Obrázek 7.2: Schéma toků energií a měření spotřeby.

### 7.1.1 Nepřímé měření příkonu palubních spotřebičů

Měření bylo realizováno pomocí dvou voltmetrů a výkonového předřadného rezistoru u zapojeného mezi kladnou elektrodu palubního akumulátoru a kladnou svorku připojení akumulátoru k vozidlu. Schéma měření viz obrázek 7.3.



Obrázek 7.3: Schéma nepřímého měření pasivní spotřeby Peugeot iOn.

V další fázi měření byly zapínány jednotlivé spotřebiče a měřen jejich příkon dle rovnice 7.1,

$$P_{BEV} = U_{Aku} \cdot \frac{U_R}{R}, \quad (7.1)$$

kde  $P_{BEV}$  je příkon vozidla ve  $W$ ,

$U_{Aku}$  napětí palubního akumulátoru,

$U_R$  je napětí na předřadném rezistoru,

a  $R$  je odpor předřadného rezistoru  $0,0015 \Omega$ .

Záznam z měření je prezentován v tabulce B.1 v příloze. Zpracované výsledky měření jsou v tabulce 7.1.

### 7.1.2 Měření příkonu palubních spotřebičů z BMS

Jak aktivní, tak pasivní spotřeba elektromobilu jsou měřeny prostřednictvím BMS v trakčním akumulátoru. Tyto údaje jsou dále zpracovávány řídicím systémem a na jejich základě je zobrazován příkon vozidla prostřednictvím ukazatele řidiči. Díky aplikaci caniOn a připojení na sběrnici vozidla prostřednictvím diagnostického konektoru OBDLink LX lze zobrazovat spotřebu vozidla. Záznamy z měření jsou v příloze v tabulce B.3. Měření bylo dvakrát opakováno (viz indexy  $U_1, U_2$  a  $I_1, I_2$ ). Dvě sady výsledků reprezentují jak vypočtený výkon jako funkci proudu a napětí, tak prezentovaný výkon z BMS. Průměrná spotřeba jednotlivých komponent je vypočtena v tabulce 7.2.

Výhodou tohoto způsobu měření je zohlednění účinnosti palubní dobíječky v příkonu komponent. Palubní dobíječka je DC/DC měnič, který z napětí trakčního akumulátoru (247–362 V) tvoří nabíjecí napětí palubního akumulátoru 14,4 V.



Tabulka 7.1: Zpracovaná data z měření pasivní spotřeby Peugeot iOn – Měření bočníkem.

Spotřebič	$P(W)$
Bazální spotřeba	50
Obrysová světla	18
Potkávací světla	124
Přední světlomety do mlhy	71
Zadní světlomety do mlhy	21
Průměrná spotřeba výstražných světel	61
Brzdová světla	19
Interiérové osvětlení	3
Minimální stupeň ventilace	26
Předposlední stupeň ventilace	74
Maximální ventilace	102
Vyhřívání sedadla řidiče	24
Audio systém	8
Přední stěrače	45
Přední ostřikovač	51
Zadní stěrač	18
Zadní ostřikovač	37

Nevýhodou měření BMS je tendence brát spotřebu jako konečnou. To není korektní, protože napětí a proud jsou měřeny u výstupu z trakčního akumulátoru. Nezohledňují tak ztráty ve vedení a chemických procesech, které zejména při extrémních teplotách nejsou zanedbatelné.

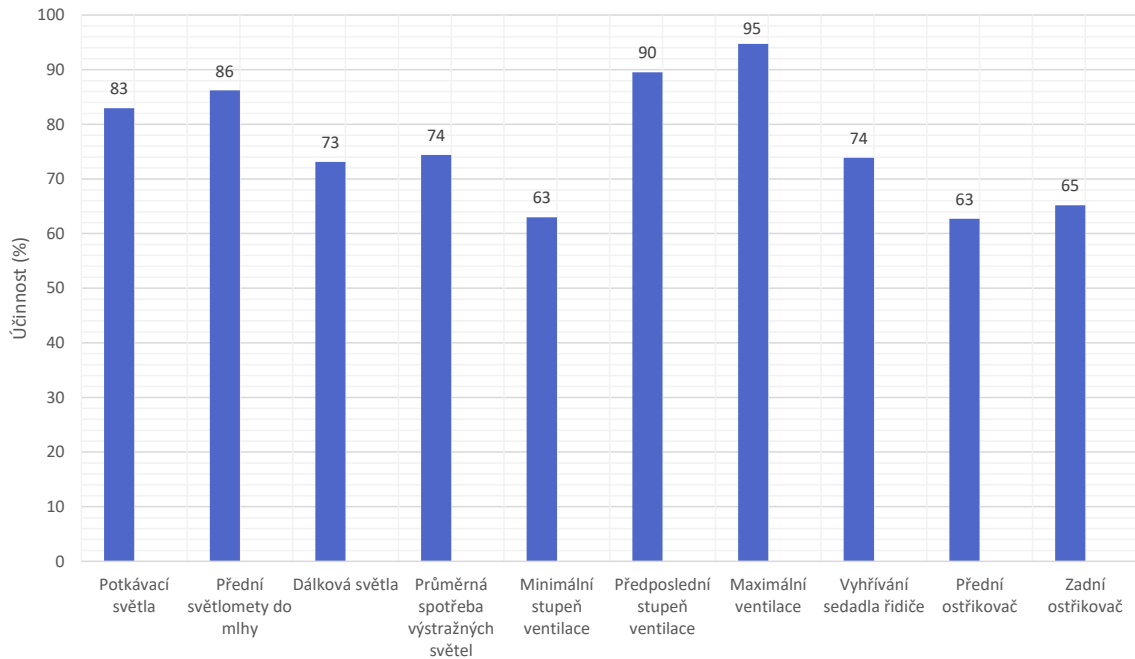
### 7.1.3 Srovnání metod, výpočet účinnosti palubního dobíjení

Na obrázku 7.2 je zobrazeno vnitřní schéma toku energií do palubních spotřebičů. Zatímco PTC ohřev a agregát klimatizace jsou napájeny nízkým napětím přímo z trakčního akumulátoru, ostatní přístroje jsou napájeny bezpečným malým napětím z palubního akumulátoru. Ten je dobíjen DC/DC měničem z akumulátoru trakčního. Srovnáním dvou prezentovaných metod měření může být vypočtena účinnost DC/DC měniče. Pro výpočet pasivní spotřeby elektromobilu je nutno zvýšit příkon jednotlivých komponent o ztráty na této dobíječe. Tato energie je skutečně odebrána z trakčního akumulátoru. Naopak v případě možnosti vypnutí DC/DC by pro výpočet sloužila hodnota bez započtení účinnosti. Na obrázku 7.4 je zobrazeno deset reprezentativních hodnot. Ostatní nebylo možno separovat vlivem vazeb na jiné přístroje nebo nemožností jejich měření.

Tabulka 7.2: Zpracovaná data z měření pasivní spotřeby Peugeot iOn – Měření z BMS.

Spotřebič	$P(W)$
Bazální spotřeba	337
Obrysová světla	0
Denní svícení	34
Potkávací světla	150
Dálková + potkávací světla	317
Přední světlometry do mlhy	83
Zadní světla do mlhy	52
Průměrná spotřeba směrových světel	41
Zpětná světla	83
Brzdová světla	33
Osvětlení SPZ	3
Interiérové osvětlení	16
Čerpadlo posilovače brzd	269
Čerpadlo chlazení	83
Ventilace „Auto“ (první)	41
Ventilace předposlední	83
Ventilace maximální výkon	107
Ventilace „Boost“	199
AC maximální výkon	960
Topení maximální výkon	4805
Topení průměrný výkon	4342
Odmržení čelního skla maximální výkon	4983
Odmržení čelního skla průměrný výkon	4378
Přední stěrač pomalý	49
Přední stěrač rychlý	75
Přední odstříkovač + stěrač	81
Zadní stěrač	16
Zadní stěrač + odstříkovač	57
Vyhřívání zadního skla	183
Vyhřívání sedačky řidiče	33
Dobíjení 12V palubního akumulátoru	33
CD + Audio maximální hlasitost	16

Graf zobrazuje účinnost vybraných komponent. Účinnost roste se stoupající spotřebou uvedenou v předchozích tabulkách 7.1 a 7.2. To je zapříčiněno konstantní spotřebou pro provoz měniče. Při vyšším příkonu spotřebiče se konstantní spotřeba měniče projeví menším dílem. Průměrná hodnota účinnosti z porovnávaných hodnot je  $\eta = 76,6\%$ . Pro plné dobití palubního akumulátoru se jmenovitým napětím 12,6 V a kapacitou 40 Ah není tedy potřeba pouhých 506 Wh, ale po započtení ztrát 660 Wh, což jsou 4,1 % celkové kapacity nového trakčního akumulátoru. To při průměrné spotřebě znamená téměř o 5,5 km nižší dojezd.

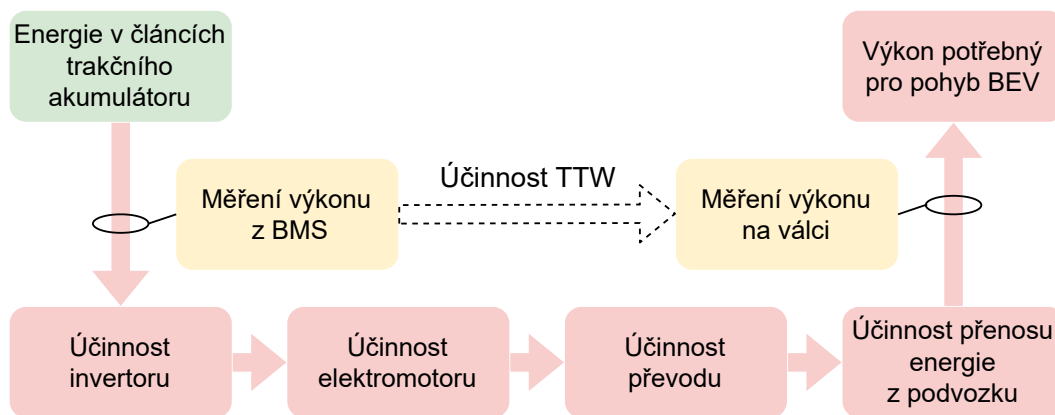


Obrázek 7.4: Účinnost palubní DC/DC dobíječky Peugeot iOn.

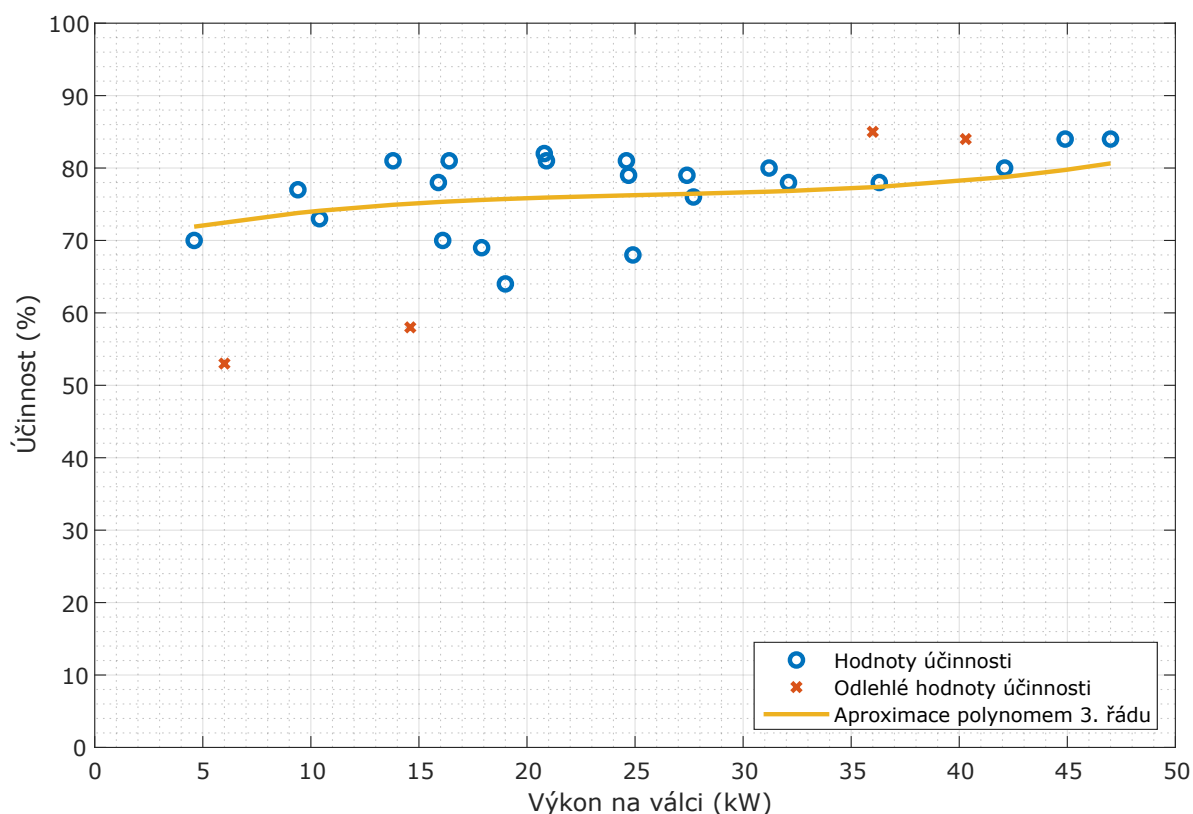
## 7.2 Měření přenosu energie „Z akumulátoru na kola“

Termín „Účinnost přenosu energie z nádrže na kola“ (z angl. „Tank to wheel“) se používá i pro bateriové elektromobily. Pro případ BEV je uvažován trakční akumulátor jako nádrž. Požadavek na znalost této účinnosti vyvstal pro potřebu srovnání celkové účinnosti ICE vozidel a nových technologií jako jsou BEV, HEV, FCEV aj. Tuto hodnotu lze odvodit ze znalosti ztrát ve všech dílčích komponentách, avšak výsledná účinnost závisí na mnoha proměnných a je ovlivněna poruchovými veličinami. Mezi soustavami komponent existují dopředné i zpětné vazby a samotné soustavy jsou nelineární a neautonomní. Díky vybavení na naší fakultě a diagnostickým nástrojům k vozidlu lze tuto účinnost identifikovat na základě naměřených dat. Schéma měření je popsáno na obrázku 7.5. Zelená barva označuje místo s možností uložení energie (zdroj), žlutá měřicí bloky a červená systémy spotřebovávající energii. Schéma 7.5 vychází z modelu BEV v kapitole 5 na obrázku 5.3.

Měření bylo realizováno na válcové zkušebně MAHA LPS 3000. Vozidlo bylo vybaveno zimními pneumatikami, teplota v místnosti byla v průběhu měření cca 20 °C, trakční akumulátor měl teplotu cca 14 °C. Testovány byly různé požadované výkony při rychlostech 30, 50, 75, 100 a 125 km/h. Bohužel při nižších rychlostech docházelo k prokluzu, čímž byla účinnost snížena. Z těchto důvodů byla aplikovaná selekce hodnot a 8 % nejvyšších a nejnižších hodnot nebylo vyhodnocováno (v grafu označeno křížkem). Graf vyhodnocovaných hodnot účinnosti přenosu energie viz obrázek 7.6, naměřená data pak v příloze v tabulce B.4.



Obrázek 7.5: Schéma měření účinnosti přenosu energie „Z akumulátoru na kola“ Peugeot iOn.



Obrázek 7.6: Graf měření účinnosti přenosu energie „Z akumulátoru na kola“ Peugeot iOn.

V grafu lze vidět, že se stoupajícím požadavkem na výkon stoupá i celková účinnost přenosu energie „Z akumulátoru na kola“. Průměrná hodnota z vyhodnocovaných pak 77,31%. Pro potřeby algoritmu může být zpracována buď hodnota průměru nebo může být pro přesnější odhady použita přenosová funkce. Po potřeby přenosové funkce byla zpracována analýza různých druhů aproximace naměřených dat viz tabulka 7.3.

Tabulka 7.3: Varianty aproximace dat účinnosti „Z akumulátoru na kola“.

Křivka	Matematická definice	Spolehlivost $R^2$
Mocninná	$\eta = 63,583 \cdot P_W^{0,0618}$	$R^2 = 0,2078$
Logaritmická	$\eta = 4,7134 \cdot \ln(P_W) + 62,598$	$R^2 = 0,2197$
Exponenciální	$\eta = 71,089 \cdot e^{0,0032 \cdot P_W}$	$R^2 = 0,2378$
Lineární	$\eta = 0,2446 \cdot P_W + 71,109$	$R^2 = 0,2513$
Polynomická 2	$\eta = 0,0027 \cdot P_W^2 + 0,1002 \cdot P_W + 72,674$	$R^2 = 0,2563$
Polynomická 3	$\eta = 0,0003 \cdot P_W^3 - 0,0233 \cdot P_W^2 + 0,6745 \cdot P_W + 69,265$	$R^2 = 0,2654$
Polynomická 4	$\eta = -2 \cdot 10^{-5} \cdot P_W^4 + 0,0025 \cdot P_W^3 - 0,0961 \cdot P_W^2 + 1,6124 \cdot P_W + 65,646$	$R^2 = 0,2696$

V tabulce 7.3 je ke každé metodě vypočtena rovněž míra spolehlivosti  $R^2$  ta roste úměrně matematické složitosti aproximace. Nejvyšší míru spolehlivosti vykazuje aproximace polynommem 4. řádu, ten díky svému průběhu neúměrně degraduje výsledky pro výkony 0–5 kW, a proto byl zvolen polynom 3. řádu. Zvolenou přenosovou funkcí je tedy křivka daná rovnicí 7.2.

$$\eta = 0,0003 \cdot P_W^3 - 0,0233 \cdot P_W^2 + 0,6745 \cdot P_W + 69,265, \quad (7.2)$$

kde  $\eta$  je účinnost a  $P_W$  je výkon potřebný na kolech v kW.

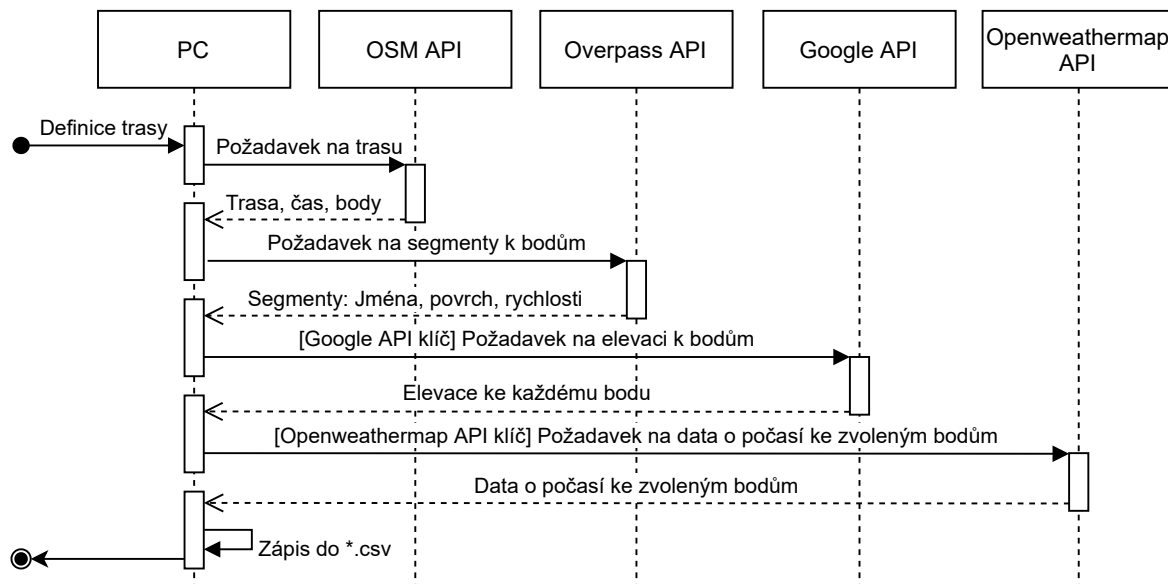
### 7.3 Získání dat o trase – program Speedgetter

Pro potřeby algoritmu je potřeba přesný model vozidla, trasy a počasí. Zatímco model vozidla je popsán jeho parametry a aktuálním stavem, model trasy je nutno získat z online zdrojů. Z online databází lze pomocí API (aplikační interface) získat potřebná data o délce trasy, odhadovaném času, ale také o každém úseku zvlášť.

Každý úsek má k dispozici své jméno, délku, maximální a průměrnou rychlost, povrch a elevaci. Tyto údaje jsou bohužel roztroušeny v několika API. Vyvinutý program Speedgetter umožňuje uživateli zadat počáteční a koncové souřadnice a sám postupně oslovuje několik API a sestavuje informace pro zvolenou trasu. Běh programu je zapsán pomocí sekvenčního diagramu na obrázku 7.7.

Pro návrh trasy je potřeba znát počáteční a koncový bod ve formě souřadnic. Mezi nimi bude generována trasa na základě algoritmu API projektu Open street map routing machine (*Project OSRM*, 2021). Dotaz na server vrátí celou trasu, její jednotlivé body (nody), vzdálenost a předpokládaný čas strávený na trase.

V další fázi je potřeba pro každou dvojici bodů dohledat segment, jeho maximální a průměrnou rychlost, název, kategorizaci a povrch vozovky. Pro tyto účely se postupně s každým párem bodů oslovuje *Overpass API* (*Overpass API*, 2021), který na každý dotaz zodpovídá sadou parametrů dílčího segmentu.



Obrázek 7.7: Sekvenční diagram programu *Speedgetter* k získávání dat o trase.

Jedním z největších konzumentů energie při jízdě je překonávání převýšení. Žádný z nalezených bezplatných API neposkytuje údaj o nadmořské výšce. Pro jejich získání bylo nutno využít API společnosti Google, a to v placené verzi. Limitem pro jeden dotaz je 500 bodů. Delší trasy je potřeba rozdělit do několika dotazů. Pro aktivaci této části programu je nutno zadat klíč (Google API key), ten je uložen v adresáři programu a načítá se automaticky. Pokud soubor není načten, program proběhne a vygeneruje výstup bez dat o elevaci.

Posledním z dotazovaných API je Openweathermap.org (*Weather API – OpenWeatherMap*, 2021). Ten umožňuje na základě dotazu se souřadnicemi poskytnout širokou škálu informací. Ke každému bodu lze zdarma získat teplotu, tlak, vlhkost, rosný bod, východ a západ slunce, rychlost a směr větru a další informace. K tomuto API je rovněž potřeba klíč a v bezplatné verzi umožňuje maximálně 60 dotazů za minutu. To by pro většinu tras nestačilo, rovněž se nepředpokládá výrazná změna počasí na několika stech metrech. Z těchto důvodů se aktualizují meteorologická data co 10 km. Výsledná data slouží k výpočtu hustoty vzduchu a k odhadnutí příkonu pasivní spotřeby. Běh celého programu je na obrázku 7.8.

Posledním krokem v běhu programu je uložení všech dat do \*.csv souboru. Jeho název lze zadat do počátečního příkazu. Není-li zadán, data se uloží do přednastaveného „route.csv“. Vzor vygenerovaných dat je v příloze v tabulce B.5. Celý kód vyvinutého programu *Speedgetter* je v elektronických přílohách.

```
Příkazový řádek
C:\Users\DD\CloudStation\Dizertace\ded0025\Speedgetter\trasy>SpeedGetter.exe 18.2493458506
34228,49.79265964543549;18.152963039732725,49.810221031778745;18.125002247811995,49.779661
0404498;18.03803121782072,49.75727306034137;17.960215735626285,49.71741534231482;17.888338
490385111,49.74841293339803 OvaPevnostFulnek.csv
SpeedGetter
-----
Requesting route... done.
Requesting streets... done.
Preparing leg 1 route path ...
Requesting streets... done.
Preparing leg 2 route path ...
Requesting streets... done.
Preparing leg 3 route path ...
Requesting streets... done.
Preparing leg 4 route path ...
Requesting streets... done.
Preparing leg 5 route path ...
Requesting elevations for 500 points ... done.
Requesting elevations for 192 points ... done.
Finished! Result has been written to the OvaPevnostFulnek.csv file.
```

Obrázek 7.8: Výstup programu *Speedgetter*.

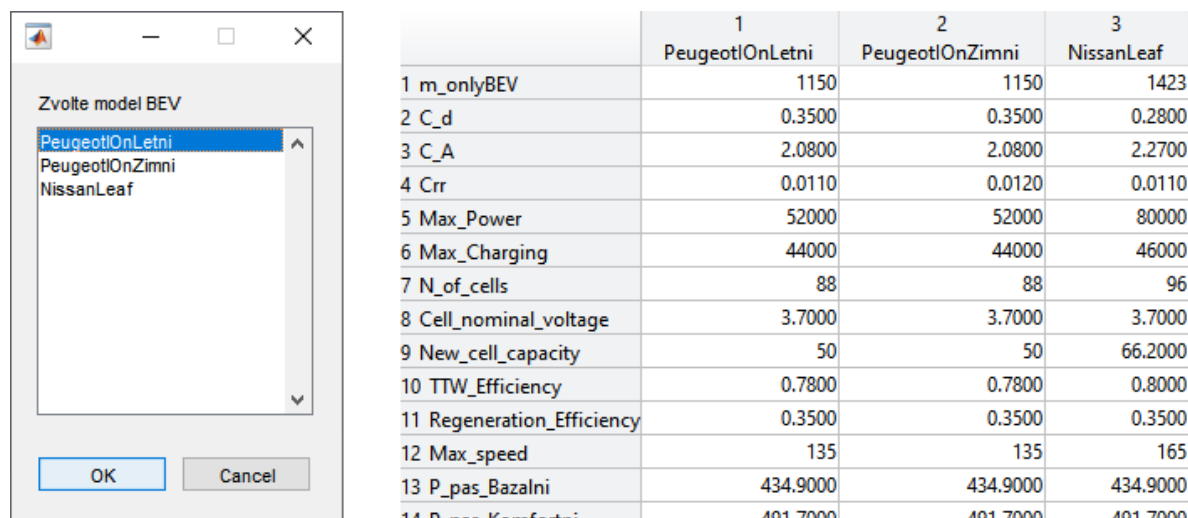
## 7.4 Realizace CMRE v programu MATLAB

V této fázi realizace CMRE algoritmu, kdy jsou data o trase získána, jsou výpočty přesunuty do programu MATLAB ve verzi 2018a, kde je CMRE algoritmus realizován. MATLAB, na rozdíl od mobilních platforem, poskytuje široké možnosti ladění, diagnostiky, zobrazování a dalších vědeckých nástrojů. Naopak nevýhodou je nemožnost spojení MATLABu s vozidlem a nemožnost zabudování programu Speedgetter do běhu algoritmu. V budoucnu by celý CMRE měl běžet na mobilním telefonu řidiče, a díky přístupu na internet a spojení s diagnostikou vozidla by se běh algoritmu uživatelsky zjednodušil. Přílohou práce je seznam všech vstupních tabulka B.7, vnitřních tabulka B.8 a výstupních tabulka B.9 proměnných. U vstupních proměnných jsou *kurzívou* označena data vystupující z programu Speedgetter. Celý program algoritmu CMRE popsáný touto kapitolou včetně všech dat a funkcí je součástí elektronických příloh této práce.

### 7.4.1 Načtení modelu vozidla

Prvním krokem v CMRE algoritmu v programu MATLAB je načtení modelu vozidla. Model obsahuje konstrukčně dané parametry vozidla, jako čelní plochu, koeficient valivého odporu a aerodynamického odporu, ale také podrobnosti o trakčním akumulátoru. Model rovněž obsahuje poznatky o pasivní spotřebě z kapitoly 7.1 formou předdefinovaných scénářů a poznatky o účinnosti přenosu energie z akumulátoru na kole z kapitoly 7.2 formou hodnot koeficientů

polynomů účinnosti TTW. Tyto informace o BEV jsou uchovány v \*.mat souboru spolu s ostatními později načítanými parametry. Po načtení údajů je požadován uživatelský vstup pro volbu konkrétního modelu. V aktuálním nastavení lze zvolit Peugeot iOn vybaven letními a zimními pneumatikami a pro ilustraci je doplněn Nissan Leaf, u toho však neproběhlo měření pasivních spotřeb ani TTW. Dialogové okno výběru modelu vozidla a náhled parametrů modelu je vidět na v obrázku 7.9.



Obrázek 7.9: Volba modelu BEV pro CMRE a zápis modelu v programu MATLAB.

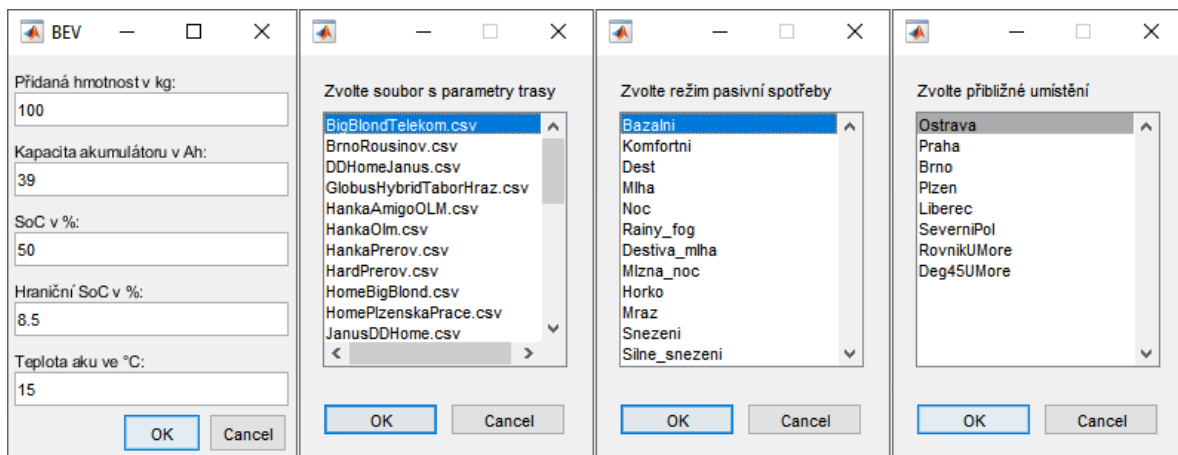
## 7.4.2 Načtení stavu vozidla, modelu počasí a trasy

V další fázi CMRE algoritmu je potřeba získat data o aktuálním stavu vozidla. Důležitý je údaj aktuální SoH, SoC a přidané hmotnosti. Tato data bude možno při napojení na vnitřní sběrnici získávat automaticky, nyní jsou zadávána vyplněním údajů ve vyskakovacích oknech. Všechna vyskakovací okna jsou na obrázku 7.10.

Dalším z volených údajů je limit pro minimální hodnotu SoC. Tento nepovinný údaj slouží k posílení psychické pohody a větší důvěře ve schopnosti vozu a tím k redukcí „Range anxiety“. Peugeot iOn zobrazuje dojezd pouze do 10% SoC, po jejich dosažení hodnota dojezdu na palubním ukazateli zmizí. Mezi 8,5 – 8% SoC<sup>1</sup> přejde vozidlo do režimu omezeného výkonu, což signalizuje kontrolka „želvy“. Oranžová kontrolka upozorňuje řidiče na možnost omezení akcelerace a maximální rychlosti. Vyzývá ho tedy k neprodlenému odstavení vozidla do bezpečí. K omezení rychlosti dochází plynule až po úplné zastavení a odpojení trakčního akumulátoru. SoC, kdy dojde k úplnému zastavení vozidla, se liší dle stavu akumulátoru.

<sup>1</sup>Tyto bezpečnostní funkce řeší BMS, nikoliv vozidlo. Nezávisí na SoC, ale na napětí jednotlivých článků. Přesné procento, kdy dojde k aktivaci režimu želvy nebo kompletnímu zastavení vozidla, je závislé na stavu akumulátoru, požadavku na výkon a teplotě.





Obrázek 7.10: Vyskakovací okna CMRE v programu MATLAB.

Dle měření několika vozidel Peugeot iOn se pohybují v rozmezí od 7 do 0,5%. Nastavení volby minimálního SoC je individuální záležitostí. Předdefinovaná hodnota je 8,5%.

Díky těmto údajům je možno vypočítat aktuální hmotnost a zejména parametry akumulátoru, konkrétně aktuální uloženou energii, maximální uloženou energii a maximální vyčerpatelnou energii, zohledňující minimální SoC. Tyto výpočty jsou v programu realizovány kódem 7.1.

---

```

m_BEV = m_onlyBEV + m_additional; % Celková hmotnost vozidla zohledňující posádku a náklad
SoH = (Cell_capacity/New_cell_capacity)*100; %(-) Stav zdraví akumulátoru
Battery_votage = Cell_nominal_voltage*N_of_cells; %(V) Celkové napětí akumulátoru
Battery_max_stored_energy = (Cell_capacity*Battery_votage); %(Wh) Maximální uložená energie
zohledňující SoH
Battery_stored_energy = Battery_max_stored_energy * (SoC/100); %(Wh) Aktuální uložená energie
zohledňující SoH a SoC
Battery_depletable_energy = Battery_max_stored_energy * ((SoC-Battery_safety_margin)/100); %(
Wh) Maximální využitelná energie zohledňující SoC SoH a min SoC

```

---

Výpis 7.1: CMRE: Výpočty energie trakčního akumulátoru.

Dalším parametrem k výběru je pasivní spotřeba (na obrázku 7.10 druhý zleva). Ta velmi úzce souvisí s počasím a denní dobou. Podle teploty a vlhkosti lze určit potřebu odmlžování skel, komfortní nastavení teploty v kabině a provoz dalších spotřebičů. Volba dne či noci ovlivní příkon světel, v kombinaci s počasím je pak možné určit například použití světel do mlhy. Další spotřebiče, jako podtlakové čerpadlo či směrovky, jsou využívány vždy a přičítají se k bazální spotřebě vozidla. Hodnoty pasivní spotřeby v různých situacích jsou v příloze v tabulce B.6. Z těchto hodnot je na začátku běhu programu nutno jednu vybrat.

Předposlední sada dat k výběru je samotná trasa (na obrázku 7.10 třetí zleva). Ta je vygenerována dříve zmíněným programem Speedgetter a uložena v \*.csv souborech. Právě jeden z těchto souborů je vybrán pro vyhodnocení algoritmem. Soubor obsahuje informace

o souřadnicích a nadmořské výšce začátku a konce každého segmentu trasy a maximální a průměrnou rychlost mezi nimi. Dále obsahuje data počasí rozpočtené aktualizované co 10 km.

Posledními parametry, které souvisí s počasím a trasou, jsou fyzikální konstanty. Jak bylo uvažováno v kapitole 5, tíhové zrychlení je závislé na nadmořské výšce a geografické poloze, hustota vzduchu je závislá na tlaku, vlhkosti a teplotě. Konstantu tíhového zrychlení lze velmi přesně spočítat z tvaru a polohy na geoidu Země. Bohužel MATLAB ve školní licenci neposkytuje možnost tyto funkce využít. Jako náhrada v algoritmu slouží možnost výběru tíhového zrychlení a poloměru zeměkoule z předdefinovaného seznamu míst (na obrázku 7.10 vpravo).

Načtená data o trase jsou inkonzistentní. V některých segmentech chybí informace o průměrné rychlosti a ve značné části sektorů chybí data o rychlosti maximální. Algoritmus potřebuje konzistentní data pro svou funkci, a proto je nutno data předzpracovat.

### 7.4.3 Předzpracování dat

Předzpracování dat znamená zajištění jejich konzistence, korektnosti a čitelnosti pro CMRE. Pro strojovou čitelnost je nejprve potřeba zaměnit všechny desetinné čárky v souboru za desetinné tečky. To řeší funkce *comma2point\_owerrwrite*.

Data pro maximální a průměrnou rychlost nejsou konzistentní, což znamená existenci úseků, pro které nejsou data k dispozici. Pro korektní funkci algoritmu je nutno definovat rychlost v těchto úsecích. Algoritmus řeší dvě konkrétní situace:

1. Počáteční rychlost nemůže být určena, neboť rychlost je získávána mezi dvěma body. Tato rychlost je nastavena na nulu, protože pro inicializaci algoritmu je počítáno se stojícím vozidlem.
2. Pokud se v datovém souboru objeví absence nějakých dat, předpokládá se trvání naposledy známého stavu. Tato metoda není jedinou možnou, nabízí se také interpolace sousedních dat. Vzhledem ke shlukové povaze chybějících hodnot není interpolace vhodnější metodou. Není zaručena její vyšší přesnost a rovněž je výpočetně náročnější.

Většinou chybějících dat jsou hodnoty rychlosti pro některé úseky. Ty jsou kriticky důležité pro přesnost výpočtu. Nahrazení těchto dat v rámci vyhodnocení přesnosti algoritmu je nutno zohlednit.

Další fází předzpracování dat je zálohování dat o rychlosti pro porovnávání při vyhodnocení a následném rozdělení dat do dvou sad hodnot. První sada je využívána pro výpočet trasy maximální možnou rychlostí – tedy nejhorším scénářem pro trasu. Druhá sada je využívána pro výpočet trasy průměrnou rychlostí – tedy scénářem, který je pro průměrného řidiče nejpřesnější. Celé předzpracování dat trasy je programově vyřešeno v kódu 7.2

---

```

% Nastavení prvního úseku trasy, kdy vozidlo stojí.
trackpoints.rho_air(1) = rhoAirCalculation(trackpoints.Temp(1),trackpoints.Humidity(1),
    trackpoints.Pressure(1)*100,g,trackpoints.Elevation(1)); % První hodnota hustoty vzduchu
trackpoints.DistanceDriven_km(1)=0; % Ujetá vzdálenost
trackpoints.Speed_kmph(1)=0; %Aktuální rychlost v km/h
trackpoints.Speed_mps(1)=0; %Aktuální rychlost v m/s
trackpoints.Max_speed(1)=50; %Předpoklad nejnižší používané max. rychlosti
trackpoints.E_tot(1)=0; %Spotřebovaná energie
trackpoints.E_bat(1) = Battery_depletable_energy; %Zbývající energie
trackpointsMAX=table(trackpoints.Max_speed); % Vytvoření druhé sady hodnot pro max rychlost
trackpointsMAX.E_tot(1)=0; %Spotřebovaná energie pro max rychlost
trackpointsMAX.E_bat(1) = Battery_depletable_energy; %Zbývající energie
Missing_MAX_Speed_Counter = 0; %Vynulování...
Missing_AVG_Speed_Counter = 0; %    ...počítadel...
Limited_MAX_Speed_Counter = 0; %    ...chybějících hodnot.

for i=2:(N_of_Segments) %Smyčka projíždějící všechny hodnoty
    if isnan(trackpoints.Max_speed(i)) %Smyčka interpolující prázdné max. rychlosti
        trackpoints.Max_speed(i) = trackpoints.Max_speed(i-1);
        Missing_MAX_Speed_Counter = Missing_MAX_Speed_Counter +1;
    end
    if isnan(trackpoints.Speed_kmph(i)) %Smyčka interpolující prázdné avg. rychlosti
        trackpoints.Speed_kmph(i) = trackpoints.Speed_kmph(i-1);
        trackpoints.Speed_mps(i) = trackpoints.Speed_mps(i-1);
        Missing_AVG_Speed_Counter = Missing_AVG_Speed_Counter +1;
    end
    if (trackpoints.Max_speed(i) > Max_Speed) %Smyčka limitující max. rychlost
        trackpoints.Max_speed(i) = Max_Speed;
        %trackpoints.Speed_mps(i) = Max_Speed/3.6;
        Limited_MAX_Speed_Counter = Limited_MAX_Speed_Counter +1;
    end
end

for i=1:(N_of_Segments) %Zálohování dat pro porovnání v grafech
    trackpoints.BackupSpeed_mps(i) = trackpoints.Speed_mps(i);
    trackpoints.BackupSpeed_kmph(i) = trackpoints.Speed_kmph(i);
end

```

---

Výpis 7.2: CMRE: Předzpracování načtených dat trasy.

#### 7.4.4 Jádru CMRE algoritmu

V CMRE algoritmu jsou nyní načteny a připraveny všechny hodnoty potřebné pro výpočet dojezdu a energie v cíli. Nejprve proběhne první cyklus, počítající pro každý krok trasy vzdálenost, úhel,  $F_S$ ,  $F_I$  a  $\rho_{air}$ . Celý proces je popsán kódem 7.3.

---

```

for i=2:(N_of_Segments)
    latlon1=[trackpoints.Latitude(i-1) trackpoints.Longitude(i-1)]; %První pár souřadnic
    latlon2=[trackpoints.Latitude(i) trackpoints.Longitude(i)]; %Druhý pár souřadnic
    [d1km(i),d2km(i)] = lldistkm(latlon1,latlon2,(earthradius+trackpoints.Elevation(i)
        /1000));
    trackpoints.Distance_km(i)=d1km(i); %Načtení vzdálenosti mezi dvěma páry souřadnic
    trackpoints.DistanceDriven_km(i)=trackpoints.DistanceDriven_km(i-1)+trackpoints.
        Distance_km(i); %Zvýšení ujeté vzdálenosti na trase
    trackpoints.DeltaElevation(i) = trackpoints.Elevation(i)-trackpoints.Elevation(i-1); %Změ
        na nadmořské výšky
    trackpoints.Alpha(i) = asin((trackpoints.DeltaElevation(i))/(trackpoints.Distance_km(i)
        *1000)); %Výpočet úhlu stoupání/klesání
    trackpoints.anglecheck(i)=rad2deg(sin(trackpoints.Alpha(i))); %Pro diagnostické účely
    trackpoints.F_s(i) = m_BEV*g*sin(trackpoints.Alpha(i)); %Výpočet síly F_s tedy změny
        potenciální energie
    trackpoints.F_r(i) = Crr*m_BEV*g*cos(trackpoints.Alpha(i)); %Výpočet síly F_r tedy potřebn
        é energie pro překonání valivého odporu
    trackpoints.rho_air(i) = rhoAirCalculationNew(trackpoints.Temp(i),trackpoints.Humidity(i),
        trackpoints.Pressure(i)*100,g,trackpoints.Elevation(i)); %Výpočet hustoty vzduchu
end

```

---

Výpis 7.3: CMRE: Výpočet vzdáleností, elevací, úhlů  $F_s$  a  $F_r$ .

Ve funkci *lldist* je vypočtena délka každého segmentu dvěma způsoby, a to Pythagorovou větou ze znalosti souřadného systému a jeho pravoúhlosti, dále Haversinovou formulí, která pomocí goniometrických funkcí počítá délky segmentů na kouli. Metody vykazují stejné výsledky při krátkých úsecích. Čím delší jsou úseky na trase, tím větší je rozdíl mezi přesnějším Haversinovým výpočtem a Pythagorovou aproximací. Pro tento vývojový algoritmus jsou použity obě metody a později ve výpisu algoritmu jsou porovnány. Průběh výpočtů je popsán kódem 7.4.

---

```

lat1=latlon1(1)*pi/180;
lat2=latlon2(1)*pi/180;
lon1=latlon1(2)*pi/180;
lon2=latlon2(2)*pi/180;
deltaLat=lat2-lat1;
deltaLon=lon2-lon1;
a=sin((deltaLat)/2)^2 + cos(lat1)*cos(lat2) * sin(deltaLon/2)^2;
c=2*atan2(sqrt(a),sqrt(1-a));
d1km=radius*c; %Vzdálenost změřena Haversinovým teorémem

x=deltaLon*cos((lat1+lat2)/2);
y=deltaLat;
d2km=radius*sqrt(x*x + y*y); %Vzdálenost měřena Pythagorovou metodou

```

---

Výpis 7.4: Funkce *lldistkm* počítající vzdálenost mezi dvěma body

V dalším kroku je na základě převýšení mezi začátkem a koncem segmentu a jeho délky vypočten sklon svahu, tedy úhel alfa pomocí funkce *arcsin*. V dalším kroku jsou vypočteny síly, které neovlivňuje rychlost, a jsou tedy shodné pro všechny rychlostní scénáře. Jedná se o sílu potřebnou pro překonání valivého odporu  $F_r$  viz rovnice 5.10 a sílu potřebnou pro změnu potenciální energie  $F_s$  viz rovnice 5.11. Posledním krokem v tomto cyklu je pro každý krok trasy vypočíst hustotu vzduchu a to pomocí serie výpočtů popsané rovnicemi 5.3–5.8 v kapitole 5.3. Tento výpočet obstarává funkce *rhoAirCalculationNew*, která je popsána kódem 7.5.

---

```
function rho_humAir2=rhoAirCalculationNew(tempC, relHumidity, seaAirPressure,g,altitude)
    M_d = 0.0289644; %(kg/mol) Molární hmotnost suchého vzduchu
    R = 8.31432; %(N*m/mol*K) Univerzální plynová konstanta

    tempK = tempC + 273.15; % Převod C na K
    p_h=seaAirPressure*exp((-g*M_d*altitude)/(R*tempK));%(Pa) Přepočet tlaku na aktuální výšku

    if (tempC < 0) %Rozhodnutí o použití výpočtu saturace pro vodu, nebo led
        p_sat = 6.1078*10^((21.875*tempC)/(tempC+265.5)); % pro <0 C
    else
        p_sat = 6.1078*10^((17.27*tempC)/(tempC+237.3)); % pro 0-35 C
    end

    p_v = ((relHumidity/100)*p_sat); % (Pa) Tlak vodních par
    p_d = p_h - p_v; % (Pa) Tlak suchého vzduchu
    M_v = 0.018016; % (kg/mol) Molární hmotnost vodních par
    rho_humAir2 = (p_d*M_d+p_v*M_v)/(R*tempK); %Výsledná hustota
end
```

---

Výpis 7.5: Funkce *rhoAirCalculationNew* pro výpočet hustoty vzduchu.

V této části algoritmus počítá se dvěma sadami dat, jednu pro jízdu maximální rychlostí a druhou pro jízdu průměrnou rychlostí. Pro obě sady platí stejný výpočet pro každý segment trasy. Výpočet pro trasu průměrnou rychlostí je vykonáván kódem 7.6.

---

```
trackpoints.TimeOfTravel_s(i) = (trackpoints.Distance_km(i)*1000)/trackpoints.Speed_mps(i)
    ; %Doba jízdy každého segmentu v s
trackpoints.TimeOfTravel_h(i) = (trackpoints.Distance_km(i))/trackpoints.Speed_kmph(i); %
    Doba jízdy každého segmentu v h
trackpoints.PassiveConsumption(i) = P_Passive*trackpoints.TimeOfTravel_h(i); %Výpočet
    pasivní spotřeby
trackpoints.acceleration(i)=((trackpoints.Speed_mps(i)-trackpoints.Speed_mps(i-1))/(
    trackpoints.TimeOfTravel_s(i)));%Výpočet akcelerace diferencí

trackpoints.F_i(i) = m_BEV*trackpoints.acceleration(i); %Výpočet síly pro změnu kinetické
    energie
trackpoints.F_A(i) = (trackpoints.rho_air(i)*C_d*C_A.*trackpoints.Speed_mps(i)^2)/2; %Výpo
    čet síly pro překonání aerodynamického odporu
```

```

trackpoints.P_i(i) = trackpoints.F_i(i).* trackpoints.Speed_mps(i); %Výpočet...
trackpoints.P_s(i) = trackpoints.F_s(i).* trackpoints.Speed_mps(i); %...přírůstků...
trackpoints.P_r(i) = trackpoints.F_r(i).* trackpoints.Speed_mps(i); %...jednotlivých...
trackpoints.P_A(i) = trackpoints.F_A(i).* trackpoints.Speed_mps(i); %...sil.
trackpoints.P_w(i) = (trackpoints.P_i(i)+trackpoints.P_s(i)+trackpoints.P_r(i)+trackpoints
.P_A(i)); %Celkový potřebný výkon na kolech
trackpoints.etha(i)= ethaCalculation(trackpoints.P_w(i)); %Výpočet účinnosti
trackpoints.P_tot(i) = trackpoints.P_w(i)/trackpoints.etha(i); %Potřebný výkon trakce
odebraný z aku
trackpoints.E_act(i) = trackpoints.P_tot(i)*trackpoints.TimeOfTravel_h(i)+trackpoints.
PassiveConsumption(i); %Energie odebraná z aku
if(trackpoints.E_act(i) < 0) %Pokud rekuperujeme...
    trackpoints.E_act(i) = trackpoints.E_act(i)*Regeneration_Efficiency; %...sniž účinnost
end
trackpoints.E_tot(i) = trackpoints.E_tot(i-1)+trackpoints.E_act(i); %Celková spotřebovaná
energie
trackpoints.E_bat(i) = trackpoints.E_bat(i-1)-trackpoints.E_act(i); %Zbývající energie v
akumulátoru
if (trackpoints.E_bat(i)<(Battery_stored_energy-Battery_depletable_energy)) %Když je
energie v tomto segmentu nižší než min SoC
    LowSoC=true; %Nastav příznak
end

```

---

Výpis 7.6: CMRE: Výpočet trasy pro průměrnou rychlost.

Z rychlosti vozidla a délky segmentu získané z programu Speedgetter je vypočten čas, za který jej vozidlo urazí.

Z času a znalosti příkonu pasivní spotřeby je vypočtena pasivní spotřeba pro segment.

Z rozdílů rychlostí ve dvou segmentech a znalosti času je vypočtena akcelerace.

Z hmotnosti a akcelerace je vypočtena potřebná síla pro změnu kinetické energie (viz rovnice 5.12).

Z hustoty vzduchu, koeficientu aerodynamického odporu, čelní plochy a rychlosti je vypočtena potřebná síla pro překonání aerodynamického odporu (viz rovnice 5.9).

Ze získaných sil jsou vypočteny přírůstky výkonů jednotlivých sil. Ty jsou následně sečteny. Pomocí funkce *ethaCalculation* je pro tento součet výkonů stanovena účinnost přenosu energie TTW  $\eta$  (viz kapitola 7.2).

Výkon potřebný pro pohyb odebraný z akumulátoru je pak podíl součtu všech výkonů a  $\eta$ .

Celkový požadavek na energii je součtem součinnů výkonu potřebného pro trakci s dobou jízdy a pasivní spotřeby.

Pokud je tento součet záporný, násobí se účinností rekuperace. Výsledná energie se pak přičte k celkové spotřebě a odečte od zbývající energie v akumulátoru.

Po provedení výpočtu pro obě sady dat o rychlosti je vyhodnoceno množství energie zbývající v akumulátoru. Pokud v cíli zbývá v trakčním akumulátoru méně uložené energie,

než je přednastavený limit (viz kapitola 7.4.2) nebo pokud kdekoliv na trase vznikl „Hill hazard“, jsou zavedena úsporná opatření pro řízení toků energií. Tato činnost se děje pouze pro výpočet průměrnou rychlostí na konci kódu 7.6.

Pokud v každém bodě trasy zbývá více energie v trakčním akumulátoru než je nastavený limit, program je ukončen výpisem dat o trase a zobrazením mapy (viz kapitola 7.4.6), pokud ne, nastává část CMRE algoritmů s řízením toku energií.

### 7.4.5 Řízení toků energií

V případě nutnosti řízení toků energií pro nižší spotřebu na trase je možno omezit rychlost, zrychlení, dobíjení palubní baterie nebo omezit HVAC systémy viz kapitola 6.4. Po vyhodnocení vlivů jednotlivých omezení na spotřebu byla nejprve vypracována úsporná opatření omezováním rychlosti. To se vykonává na základě vyhodnocení o nedostatku energie z konce minulé kapitoly.

Nejprve je v konzoli programu oznámeno, že se zavádí nebo zesilují úsporná opatření společně s údajem o zůstatku energie v trakčním akumulátoru. V dalším kroku je odečtena přednastavená kroková hodnota od každého údaje rychlosti na trase, kromě:

- Rychlosti na dálnici, pokud by výsledná rychlost byla nižší než 80 km/h.
- Rychlosti kdekoliv jinde, pokud by výsledná rychlost byla nižší než 60 km/h.

Toto cílené omezování rychlostí zajišťuje kód 7.7.

---

```
if (Restriction == true) %Když zavádíme restrikce
    if (trackpoints.Speed_kmph(i) > 60) %Když je rychlost v segmentu vyšší než 60kmph
        trackpoints.Speed_mps(i) = trackpoints.Speed_mps(i) - SpeedCorectionStep/3.6; %...
            sniž rychlost o nastavený krok.
        trackpoints.Speed_kmph(i) = trackpoints.Speed_kmph(i) - SpeedCorectionStep;
    end
    if (trackpoints.Speed_kmph(i) < 80 && isequal(trackpoints.Highway(i), 'motorway')) %když
        je segment definován jako dálnice...
        trackpoints.Speed_mps(i) = 22.3;
        trackpoints.Speed_kmph(i) = 80; %...nastav rychlost na 80 kmph
    end
end
```

---

Výpis 7.7: CMRE: Řízení toků energií – omezení

Celý výpočet je opakován, dokud nenastane jedna ze dvou možností:

- Po výpočtu zbývá dostatek energie v každém bodě trasy.
- Vypočtená energie začne vlivem pasivní spotřeby namísto přibývání ubývat (viz kap. 7.4.5), tedy nová vypočtená energie v akumulátoru v cíli je nižší než v předchozím kroku.

Cyklické opakování programu a vyhodnocovací sekvenci realizují kód 7.8. Vzhledem k délce kódu je kód zkrácen pouze na relevantní minimum a ostatní úseky jsou odkázány.

---

```
TargetNotInRange = true; %Není cíl v dojezdu BEV?
TargetUnreachable = false; %Není cíl dosažitelný?
Restriction = false; %Byly zavedeny nějaké restriktce?
LowSoC = false; %Vznikl na trase nedostatek SoC?
Cycle = 1; %Iterace úsporných opatření
Ebat_last=-inf; %Poslední vypočtená energie potřebná k dosažení cíle
SpeedCorectionStep = 5; %(kmph) Krok zpomalování
fprintf('Zpracovávám data o trase...\n');
V těchto místech je kód 7.3.
fprintf('Zpracovávám variantu jízdy maximální rychlostí...\n');
V těchto místech je kód podobný kódu 7.6 pro maximální rychlost na trase.
fprintf('Zpracovávám variantu jízdy průměrnou rychlostí...\n');
while (TargetNotInRange==true && TargetUnreachable == false)
for i=2:(N_of_Segments)
V těchto místech je kód 7.7.
V těchto místech je kód 7.6.
end
    if (LowSoC == true) %Když během celé cesty byl nastaven příznak nízkého dojezdu
        if Ebat_last >= trackpoints.E_bat(i) %Když je spotřeba vyšší než v minulé iteraci...
            TargetUnreachable=true; %...ukonči výpočet a nastav příznak "cíl nedosažitelný".
            fprintf(2, 'CHYBA: Výpočet ukončen, ani po aplikaci úsporných opatření není dost
                energie k-doezdu do cíle!\n')
        else %Pokud není potřebná energie vyšší než v minulé iteraci...
            Ebat_last=trackpoints.E_bat(i); %Ulož současnou energii
            if(Restriction == true) %Vytiskni varování o zavedení / zesílení opatření.
                fprintf(2,'VAROVÁNÍ: Destinace je stále nedosažitelná zesiluji úsporná opatření
                    !\n')
            else
                fprintf(2,'VAROVÁNÍ: Destinace je nedosažitelná zavádím úsporná opatření!\n')
            end
            Restriction = true; %Nastav příznak o zavedení restrikcí.
            fprintf('Zbývající uložená energie je pouze %4.0f Wh! Zkousím zpomalit o %1.0f km/h
                !...\n', trackpoints.E_bat(i), SpeedCorectionStep*Cycle);
            Cycle = Cycle + 1; %Inkrementuj počet cyklů
            LowSoC=false; %vypínám příznak nízkého SoC
        end
    end
else
    TargetNotInRange=false; %Destinaci je možno dosáhnout - příznak ukončující cyklení
end
end
```

---

Výpis 7.8: CMRE: Řízení toků energií – vyhodnocení



Pokud plánované cyklické provádění programu během jízdy vyhodnotí, že úsporná opatření v nastavené míře nejsou potřeba, může je snížit, a tak dovolit vyšší rychlost, zrychlení nebo výkon HVAC. Při vyhodnocování každého ujetého kilometru na trase tím vznikne i dostatečná hystereze pro omezení kmitání výsledků. Další výhodou implementace do vozidla je možnost zmenšit kroky na jednotky km a tím i případné skoky v rychlosti pod úroveň detekovatelnou posádce.

Vzhledem ke špatné možnosti sledování, vyhodnocování a omezování akcelerace se algoritmus pro současný stav nezabývá omezováním akcelerace. Ze stejného důvodu není nasazeno omezování pasivní spotřeby. Peugeot iOn separátně měří pouze výkon klimatizace a elektrického vytápění. Vzhledem k vnitřní regulaci teploty není možno tyto výkony řídit jinak než manuálně. Posledním způsobem zmíněné úspory energie je odpojení palubního akumulátoru. Toto odpojení bylo pokusně provedeno, DC/DC měnič zajišťující dobíjení palubního akumulátoru byl odpojen, vozidlo si nadále zachovalo funkčnost a zřetelně klesla spotřeba. Prakticky by bylo potřeba tyto změny implementovat a vozidlo dovybavit několika hardwarovými moduly pro sledování a omezování akcelerace, výkonu HVAC, či pro odpojování palubního DC/DC měniče. Vývoj hardwarových modulů omezujících akceleraci, příkon HVAC a odpojovací DC/DC měnič zohledňujících bezpečnost a komunikujících s vozidlem je nad rámec této práce.

#### 7.4.6 Výstupy CMRE algoritmu

Pro diagnostické účely bylo do programu zakomponováno několik hlášení v podobně výpisů do konzole<sup>2</sup>. Příkladem je trasa z VŠB do Přerova, která je zpracována na obrázku 7.11.

Konzole nejprve popisuje průběh výpočtu popsáno v předešlých kapitolách. Výpisy korespondují s kódem 7.8.

Při kontrole zbývající energie při vyhodnocování trasy průměrnou rychlostí je zjištěno, že energie nedostačuje k dojetí do cíle se zvolenou rezervou. Je zobrazeno varování o nedostatku energie, informující rovněž o zavedení úsporných opatření, a to snížením rychlosti o 5 km/h.

Po zopakování celého výpočtu je několikrát zobrazena podobná zpráva lišící se pouze hodnotou energie a snížené rychlosti.

Po dokončení výpočtu následuje informativní výpis rekapitulující vstupní hodnoty pro zvolenou trasu, pasivní spotřebu, přidanou hmotnost, SoH, SoC a minimální SoC.

Další informace se týkají dat o trase a jejich zpracování. Nejprve jsou porovnány obě metody výpočtu délky každého segmentu včetně rozdílů v jejich výpočtu. Na obrázku je hodnota rozdílů metod pod 0,01 mm, což je daleko nad rámec přesnosti mapových podkladů. Rovněž je poskytnuta informace o počtu segmentů a maximální délce segmentu. Ta souvisí s přesností metod výpočtu jeho délky.

<sup>2</sup>Kód v MATLABu neobsahuje žádné vědecké výpočty, proto jej nepřipojuji, je však k nalezení v elektronických přílohách práce.

Zahájení výpočtu...  
 Zpracovávám data o trase...  
 Zpracovávám variantu jízdy maximální rychlostí...  
 Zpracovávám variantu jízdy průměrnou rychlostí...  
**VAROVÁNÍ: Destinace je nedosažitelná zavádím úsporná opatření!**  
 Zbývající uložená energie je pouze -259 Wh! Zkousím zpomalit o 5 km/h!...  
**VAROVÁNÍ: Destinace je stále nedosažitelná zesiluji úsporná opatření!**  
 Zbývající uložená energie je pouze 607 Wh! Zkousím zpomalit o 10 km/h!...  
**VAROVÁNÍ: Destinace je stále nedosažitelná zesiluji úsporná opatření!**  
 Zbývající uložená energie je pouze 1349 Wh! Zkousím zpomalit o 15 km/h!...

Vyhodnocení pro trasu na základě souboru HardPrerov.csv a Komfortní pasivní spotřebě:  
 Počáteční podmínky: Přidaná hmotnost = 160 kg; SoH = 89%; SoC = 100%; Min SoC = 10.0%;  
 Délka trasy je rovna 75.29 km podle Haversinovy metody a 75.29 km podle Pythagorovy metody. Rozdíl v délce tras obou metod je 0.00000375 m.  
 Trasa je rozdělena na 911 segmentů. Nejdelší segment má 0.5796 km.  
 Chybí 134 (or 14.7 %) hodnot maximální a 0 (or 0.0 %) průměrné rychlosti.  
 Nejvyšší bod trasy je 339.9 mm, nejnižší je 209.2 mm. Maximální úhel stoupání je 7.22 °, maximalní úhel klesání je -14.9 °, průměrný úhel je -0.213 °.

Na trase dochází k Hill Hazardu.

Vyhodnocení pro jízdu maximální rychlostí:  
 Čas trasy je 0 h 42 min Průměrná rychlost je 106 km/h.  
 Celková spotřeba je 17475.1 Wh.  
 Celková pasivní spotřeba za těchto podmínek je 347.6 Wh, což je přibližně 1.99 % z celkové spotřeby.  
**VAROVÁNÍ: Cíl je nedosažitelný při jízdě maximální rychlostí!**  
 Zbývající uložená energie v cíli je pouze -4435 Wh; SoC v cíli -30.6 %

Vyhodnocení pro jízdu průměrnou rychlostí:  
 Čas trasy je 0 h 57 min Průměrná rychlost je 78.6 km/h.  
 Celková spotřeba je 11011.6 Wh.  
 Celková pasivní spotřeba za těchto podmínek je 470.8 Wh, což je přibližně 4.28 % z celkové spotřeby.  
 Zbývající uložená energie v cíli je 2029 Wh; SoC v cíli 14.0 %

**UPOZORNĚNÍ: Na trase bylo zavedeno omezení pro garanci dojezdu co cíle!**  
 Rychlost na dálnicích a mimoměstských komunikacích je snížena o 20 km/h  
 Průměrná rychlost na dálnici je 88 km/h

Zobrazuji průběhy rychlostí  
 Zobrazuji mapu s navrhovanou trasou

Obrázek 7.11: Diagnostický výpis z procesu vyhodnocení trasy Ostrava–Přerov CMRE.

Další část výpisu diagnostikuje konzistenci dat, v tomto výjimečném případě jsou přítomny všechny informace o maximální rychlosti po celé trase, naopak dvě hodnoty průměrné rychlosti chybí.

V následujících řádcích jsou cenná data o nadmořské výšce trasy a jejím celkovém charakteru.

Následuje vyhodnocení pro maximální rychlost po celé trase, tedy nejhorší možný legální scénář.

Trasa délky 75,29 km by vozidlu trvala 42 minut při průměrné rychlosti 106 km/h. Pro takovou jízdu by bylo potřeba cca 17,475 kWh elektrické energie v akumulátoru<sup>3</sup>. Pasivní spotřeba BEV by dosáhla 1,99 %, tedy cca 0,348 kWh.

Červeně zobrazený text varuje uživatele, „Cíl je nedostupný pro jízdu maximální rychlostí“, s přidáním hodnot energie a SoC v cíli, v tomto případě záporných (chybějících).

Celý proces se opakuje pro výpočet průměrné rychlosti, který byl ponížěn o rychlosti v rámci zavedení úsporných opatření.

Trasa délky 75,29 km trasa by vozidlu trvala 57 minut při průměrné rychlosti přibližně 79 km/h. Pro takovou jízdu by bylo potřeba cca 11,012 kWh elektrické energie v akumulátoru. Pasivní spotřeba BEV by dosáhla 4,3 %, tedy cca 0,471 kWh.

Dalšími informacemi je výše energie a SoC v cíli. Hodnota 14 % se blíží zvolenému limitu 10 %. O průběhu této trasy lze prohlásit, že optimálně využila energii v trakčním akumulátoru a zároveň ušetřila čas.

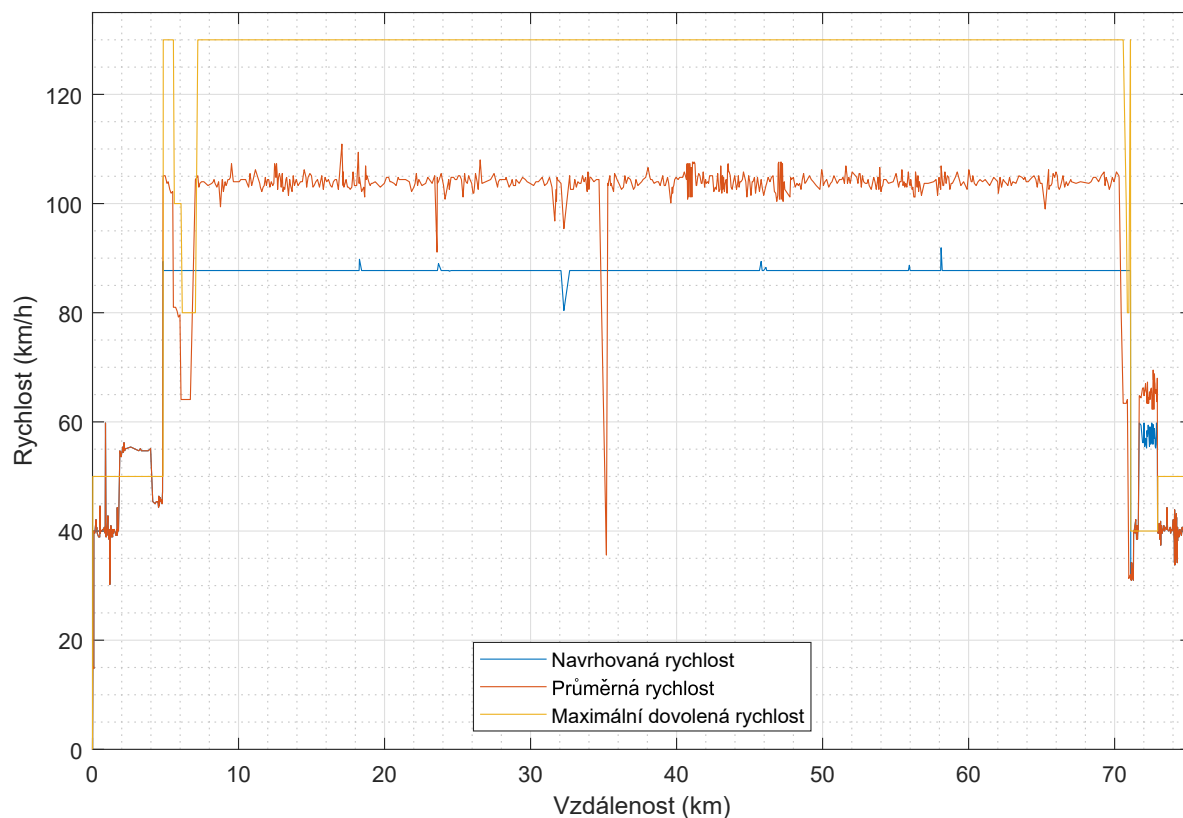
Poslední ze sady informací je upozornění o aplikování úsporných opatření, jejich velikost a z toho odvozená maximální rychlost na dálnici.

Následuje vygenerování grafů, například 7.12 na kterém je zaznamenán průběh maximální, průměrné a doporučené rychlosti.

Maximální rychlost je dána zákonnými limity pro daný typ úseku. Průměrná rychlost je informací z poskytovaných telemetrických údajů uživatelů mapových podkladů. Tato rychlost bude zřejmě zkreslená vozidly s nižší maximální provozní rychlostí, zejména autobusy a nákladními vozidly. Průměrná rychlost se na českých dálnicích pohybuje mezi 103 a 107 km/h. Doporučená rychlost je odvozena z průměrné rychlosti, ponížena o nutnou úsporu a následně vyhlazena. V tomto konkrétním případě je ponížena o 20 km/h a její průměr se pohybuje okolo 88 km/h. V grafu je přibližně na 6. kilometru trasy zřetelný zajímavý úkaz. V Klimkovickém tunelu klesá povolená rychlost k 80 km/h. Algoritmus se snaží rychlost udržet na hodnotě 80 km/h, protože je v mapách označen jako dálnice, a tedy s minimální povolenou rychlostí 80 km/h. Průměrná rychlost se v těchto místech pohybuje okolo 62 km/h. Další neobvyklý jev se v grafu vyskytuje na 35. km trasy, kde se dělí dálnice a na zvolené trase je abnormální úsek. Nový úsek, na kterém nejspíše nejsou konzistentní data o průměrné rychlosti. Přesto díky označení jako součást dálnice algoritmus nesnížil rychlost pod 80 km/h.

---

<sup>3</sup>Pro potřebnou dobitou hodnotu z dobíjecí stanice by bylo potřeba započíst účinnost dobíjení.



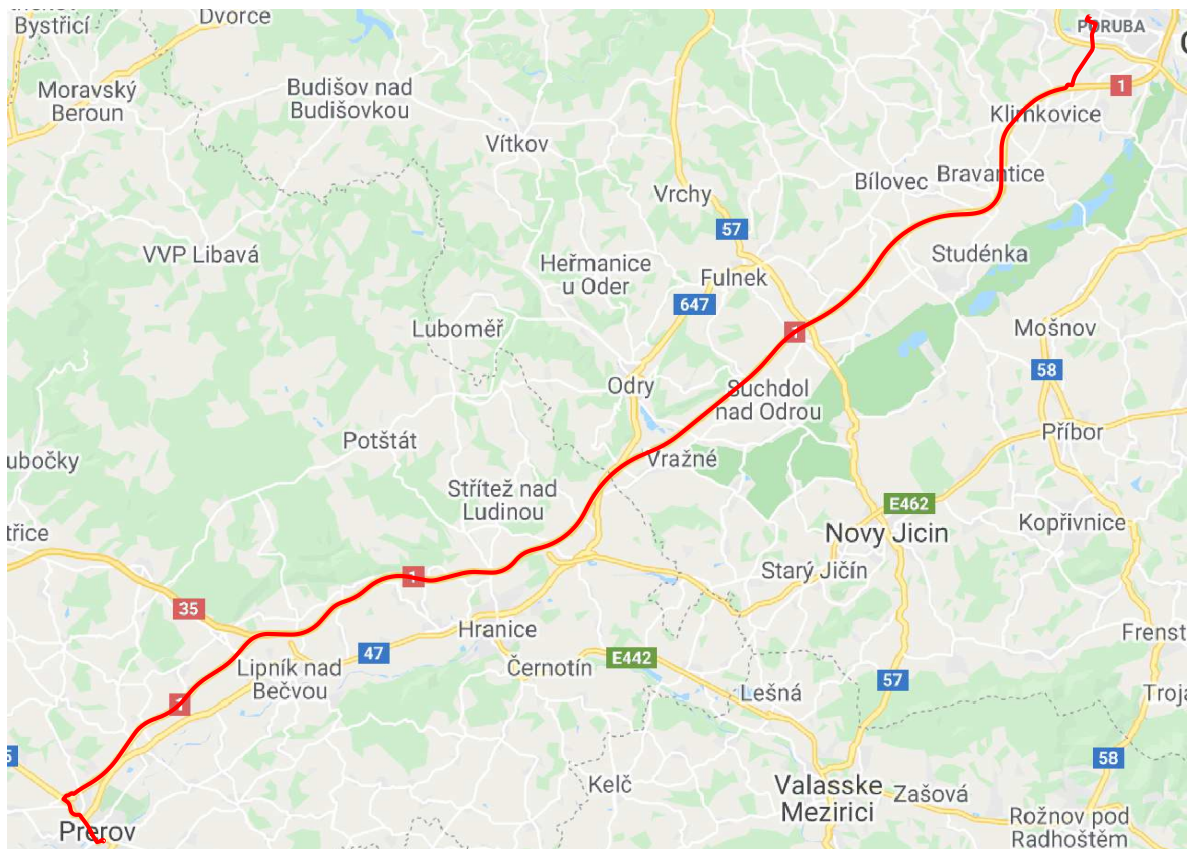
Obrázek 7.12: Maximální, průměrná a doporučená rychlost vygenerovaná CMRE algoritmem.

Je k dispozici několik dalších diagnostických grafů. Jako poslední je zobrazena mapa 7.13. Ta je v MATLABu propojena online s Google API, a tím poskytuje aktuální mapové podklady a možnost posouvání a přibližování či oddalování mapy. Tato mapa je pro řidiče velmi důležitá, protože přesně specifikuje danou trasu pro kterou byly hodnoty vypočteny. Vygenerováním a zobrazením této mapy se lze vyvarovat nedorozumněním, kdy by řidič mohl jet po trase na kterou je zvyklý, ale která může být suboptimální.

Popisovaná cesta z Ostravy do Přerova byla absolvována v rámci ověření přesnosti algoritmu. Výsledky jsou popsány v kapitole 8 v tabulce 8.1 trasa číslo 14. Jde o nejdelší trasu s aplikací řízení toků energií.

Výstup algoritmu může být u jiných tras pozměněn, například v situaci, kdy úsporná opatření nebudou stačit a vozidlo bude muset na trase dobít energii. Tato událost se zobrazí v konzoli jako chyba s výzvou k dobíjení a přeplánování trasy.

Nejčastější zprávou bude, že trasa je dosažitelná maximální rychlostí. To znamená, že i v nejhorsím případě je vozidlo schopno dorazit do cíle.



Obrázek 7.13: Mapa trasy Ostrava–Prerov vygenerována CMRE algoritmem.

## 7.5 Analýza CMRE algoritmu

Vývojové stádium algoritmu sebou nese jistá omezení. Budou tedy rozebrány dva různé aspekty. Nejprve budou zhodnoceny výstupy vytvořeného programu a v druhé části této kapitoly budou diskutovány nezpracované a nezpracovatelné funkcionality CMRE algoritmu.

### 7.5.1 Diskuze použitého programového vybavení

Kritická místa jsou dvě, a to:

- Omezení způsobené nedostatkem dat.
- Omezení z nutnosti bezpečnosti a měřitelnosti výsledků.

Omezení způsobené nedostatkem dat je dáno zvoleným programovým vybavením, jelikož program MATLAB nebyl vytvořen k rozsáhlým dotazům na online API. Program MATLAB je limitován licencemi. Pro VŠB ani TAMK<sup>4</sup> nebyla zakoupena licence pro balíčky obsahující přesný výpočet tíhového zrychlení na základě polohy. Další API, který by doplnil program a rozšířil jeho funkcionality na plánovanou úroveň, by byly seznamy dobíjecích stanic. Tato data je možno získat z několika stránek, například Plugshare, EVmapa aj. Na základě těchto dat by bylo možno místo manuálního dělení trasy celý proces zautomatizovat. Výzkumný tým z univerzity ve Wollongongu tuto funkcionality implementoval prostřednictvím placeného Google API.

Omezení z důvodu bezpečnosti a měřitelnosti spočívá zejména v prováděných úsporných opatřeních. Z fyzikálních zákonů a praktických poznatků je zřejmé, že zmírnění akcelerace nebo snížení výkonu cennou energií ušetří. Tyto zásahy do vozidla však vyžadují dlouhý vývoj, testování a nákladnou certifikaci hardwarových modulů zasahujících do řízení vozidla, aby bylo možno vozidlo testovat na veřejných komunikacích. Teoreticky jsou tyto zásahy zpracovány, avšak jejich implementace do programu nebyla realizována. Testování úspory energie závisí na míře akcelerace, je odvislé na možnosti její limitace nebo alespoň možnosti sledování její hodnoty. Ani diagnostická data vozidla neposkytují údaje o zrychlení. Proto je v současné podobě programu úspora implementována pouze jako snižování rychlosti. Fakticky je na delších trasách (pro které je úspora relevantní) energeticky nejnáročnější právě rychlost, a proto má její snížení největší efekt.

U některých zkoumaných tras je množství chybějících dat o maximální rychlosti v desítkách procent. Vyvstává zde otázka, jakým způsobem dohledat a v krajním případě chybějící data nahradit. Dohledání dat prostřednictvím jiného API je nejjednodušší možností. Další možností je odhad maximální rychlosti na základě jména ulice, čísla silnice, povrchu či typu vozovky. V implementovaném nahrazení dat poslední známou hodnotou je možno uvažovat

---

<sup>4</sup>Tampere University of Applied Sciences – má hostující univerzita v rámci pracovní stáže ve Finsku

nad vhodnější variantou aproximace. Po prozkoumání těchto možností bylo zjištěno, že každý způsob nahrazení dat je výhodnější v jiné situaci a nelze proto určit jednoznačně nejlepší variantu.

Nezohlednění teploty a využitelné kapacity akumulátoru je jedním z nejkritičtějších míst funkcionality programu. Navzdory možnosti interpolovat hodnoty využitelné kapacity v závislosti na teplotě článků na základě specifikací udaných výrobcem, není tato funkcionality dostačující, a proto není implementována. Každý článek se vlivem své vnitřní impedance zahřívá ztrátovým výkonem. Snížení rychlosti a zrychlení v rámci tohoto programu zapříčiní menší ohřev akumulátorů, což může vést k menšímu dojezdu než v případě rychlejšího zahřátí. Termodynamické jevy v sekundárních elektrochemických člancích se v současné době zkoumají ve spolupráci s odborníky na lithium-iontové články z VUT v Brně.

### 7.5.2 Diskuze funkcionalit CMRE algoritmu

Hlavním vylepšením celého algoritmu by bylo rozsáhlejší měření TTW. Statisticky významější vzorek měření na různých vozidlech, za různých podmínek a zejména v rozsahu 0–20 kW potřebného výkonu by mohl zpřesnit výpočty v různých podmínkách. Bohužel, zatím se nepodařilo nalézt dostupné zkušebny s možností trvalé změny teploty.

Jízda v tzv. „větrném pytli“, tedy v aerodynamickém krytu za velkým vozidlem, může spotřebu snížit i zvýšit. Vše záleží na tvaru, rychlosti a zejména vzdálenosti interagujících vozidel. Tato metoda je oblíbeným nástrojem řidičů BEV pro zvýšení dojezdu na dálnicích. Automobilka Tesla počítá s autonomním řízením v tzv. „convoy mode“, tedy režimu konvoje. Její plně elektrické tahače využívající aerodynamických krytů značně sníží spotřebu a tím cenu za dopravu přepravovaného zboží. Pro algoritmus určující dojezd je téměř nemožné vypočítat úsporu energie jízdou za neznámým vozidlem. Vzhledem k nedodržování bezpečné vzdálenosti v tomto jízdním režimu je doporučení takové jízdy nevhodné.

Obtížně detekovatelným vlivem na spotřebu je připojení přívěsného vozíku. I když se soudobé elektromobily jen velmi výjimečně vyrábějí s tažným zařízením, pro teoretické nahrazení vozového parku elektromobily je potřeba zvažovat i tuto variantu. Při připojení vozíku k automobilu se mění koeficient aerodynamického odporu, rozložení hmotnosti, celková hmotnost a nepatrně i pasivní spotřeba. Žádný z těchto parametrů nelze snadno změřit a musí být zadán manuálně. Výhodou může být možnost automatického započtení předem nadefinovaných parametrů vozíku do spotřeby při jeho připojení k vozidlu.

Složitým odhadem vlivu na spotřebu je rychlost a směr větru. Může být využit API s daty o počasí a získat tak v každém bodě přesný směr a rychlost větru. Navzdory tomu je značná část silnic chráněna před větrem, a to jak přírodními, tak umělými překážkami. Tyto překážky mohou vítr oslabit, ale také přeměrovat. Tyto vlivy mohou být zásadní zejména ve vysokých rychlostech na dálnici, kde jsou často instalovány protihlukové zástěny blokující

vítr. Neexistuje způsob, jakým určit směr a rychlost větru v každém bodě, a to zejména kvůli přítomnosti ostatních účastníků provozu. Při pokusech implementovat průměrnou hodnotu větru na trase docházelo k značným odchylkám od měřených hodnot. Pro odhad těchto vlivů mohou posloužit pouze statistická data.

Režim jízdy, který CMRE nezohledňuje je tzv. „plachtění“, tedy jízda na neutrálu z kopce dolů. Tento režim nepodporují všechna BEV, používá jej minimum řidičů kvůli obavám o motor a vzhledem k nižší účinnosti brzděného systému a delší reakční době brždění se v návodech BEV nedoporučuje režim využívat jindy než v opodstatněných případech v rámci servisu a nouzových situací.

Poslední možností, která byla navržena pro implementaci do CMRE je omezení rekuperace při vysokých hodnotách SoC, a i s ohledem na teplotu trakčního akumulátoru. Je pravda, že část BEV omezuje maximální výkon, pokud je akumulátor nabit na vysoké hodnoty SoC a je pravda, že při nízkých teplotách se toto omezení kvůli ochraně trakčního akumulátoru zvyšuje. Vozidlo Peugeot iOn toto omezení téměř nemá, a to nejspíše díky obecně nízkému výkonu vozidla. Pro univerzální nasazení CMRE algoritmu pro všechny BEV by tato funkcionality měla být zpracována a odzkoušena na dalších vozidlech.

Výsledky konfrontace CMRE algoritmu s reálnými trasami i s vestavěným algoritmem vozidla prezentuje kapitola 8.

## 7.6 Optimalizace trasy pomocí výstupů CMRE algoritmu

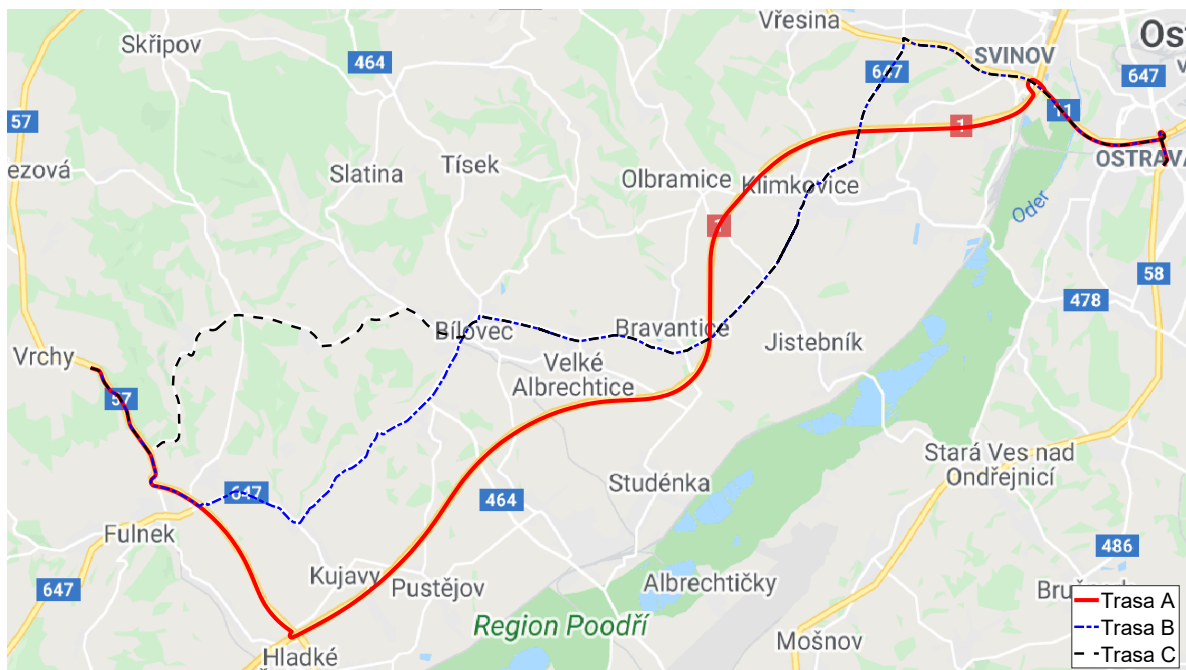
V kapitole 6.5 byly popsány možnosti optimalizace tras dle různých kritérií za použití CMRE algoritmu. Pro příklad tohoto využití byla vzata trasa z Ostravy do obce Vrchy u Fulneku, kam je možno dojet nejméně třemi cestami. Tyto trasy byly zadány do CMRE algoritmu a jejich výsledky srovnány v tabulce 7.4. Trasy jsou zobrazeny v mapě na obrázku 7.14.

Tabulka 7.4: Srovnání tras Ostrava–Vrchy dle optimalizačních kritérií.

Ostrava–Vrchy	A	B	C
Vzdálenost (km)	38,7	40,5	40,7
Průměrná rychlost (km/h)	78,7	54,8	50,0
Čas cesty (min)	30	44	49
Spotřeba energie (Wh)	6547	4810	4601
Průměrná spotřeba (Wh/km)	169,0	118,7	113,1

V tabulce 7.4 lze pozorovat neobvyklý jev, kdy nejrychlejší trasa A vedoucí po dálnici je zároveň trasou nejkratší. Z důvodu vyšší průměrné rychlosti na dálnici je spotřebovaná energie o 36, respektive 42 % vyšší oproti zbývajícím trasám. Dvě zbývajících trasy vedou mimo dálnici. Z tohoto důvodu jsou sjízdné i pro vozidla s provozní rychlostí nižší než 80 km/h a





Obrázek 7.14: Mapa tras Ostrava–Vrchy vygenerovaných algoritmem.

pro vozidla bez dálniční známky. Z porovnání těchto dvou tras vychází výsledek, že kratší a rychlejší trasa B je zároveň energeticky náročnější než trasa C.

Uživatel by dle volby optimalizačního kritéria dostal vždy jiný výsledek. Pokud by chtěl být v destinaci co nejdříve, CMRE algoritmus by mu doporučil trasu A vedoucí po dálnici. Pro nejkratší cestu mimo dálnici by doporučil trasu B kolem města Fulnek a pro nejúspornější dojetí do cíle by doporučil trasu C vedoucí přes Lukavec.

## Kapitola 8

# Ověření funkčnosti CMRE algoritmu

Pro ověření funkčnosti CMRE algoritmu z kapitoly 7 bylo podniknuto několik desítek měřených tras elektromobilem Peugeot iOn. V této kapitole bude postupně popsán princip měření a vyhodnocení dat, budou okomentovány výsledky měření, bude vedena diskuze nad výsledky a na závěr kapitoly budou porovnány výsledky výpočtu dojezdu pomocí vnitřního algoritmu vozidla (RR) a pomocí CMRE algoritmu.

### 8.1 Princip vyhodnocení

Trasu bylo potřeba nejprve naplánovat, vygenerovat k ní data prostřednictvím programu Speedgetter a následně použít vytvořený algoritmus CMRE z kapitoly 7 pro výpočet spotřeby a případné řízení energií.

Dalším krokem bylo absolvovat navrženou trasu a během ní měřit telemetrická data ve vozidle. K tomuto měření slouží kombinace diagnostického nástroje OBDLink LX, který byl zapojen na vnitřní datovou sběrnici vozidla a dedikovaný tablet (Nexus 7 s OS Android 5.1.1) s programem caniOn ke sběru dat. OBDLink a tablet spolu komunikují pomocí bezdrátové komunikace Bluetooth. Na tabletu se ve spuštěné aplikaci caniOn po spárování s diagnostikou začala načítat data, která OBDLink vyčítal z vnitřní sběrnice vozidla. Na jejich základě pak dovedl zobrazit a zpracovat značné množství dat, čehož bylo dříve využito při identifikaci vnitřních algoritmů BEV v kapitole 4.3. Mimo jiné dovedl vypočítat i vydanou energii z akumulátoru a dodanou energii z regenerativního brždění a dobíjení. Dalším užitečným diagnostickým nástrojem je přesný stav nabití (SoC) a stav zdraví (SoH), které jsou klíčovými vstupními parametry CMRE algoritmu.

Spotřeba na každé trase byla zaznamenávána a následně může být porovnávána s výstupy algoritmu. V tabulce 8.1 je 14 reprezentativních výsledků tras různých délek.

Tabulka 8.1: Porovnání výstupu z CMRE algoritmu s naměřenými daty na vybraných trasách.

Číslo trasy	Jméno trasy (Start–Cíl)	Výpočítané hodnoty trasy					Naměřené hodnoty trasy					Výhodnocení odchylky		
		Délka trasy (km)	Čas (min)	Spotřeba (Wh)	Omezení (km/h)	Vzdálenost (km)	Čas (min)	Spotřeba (Wh)	Vzdálenost (%)	Čas (%)	Spotřeba (%)			
1	OvaJih–Poruba1	7,9	9	1 139	–	8,0	9	1 117	0,7	0,0	1,9			
2	OvaJih–Poruba1	8,1	10	857	–	7,6	9	874	–6,8	–10,0	–2,0			
3	Poruba1–Centrum	9,3	13	703	–	9,3	15	697	0,2	15,4	0,9			
4	Poruba8–OvaJih	11,0	12	1 291	–	10,7	13	1 284	–2,8	8,3	0,5			
5	Petřkovice–OvaJih	11,5	15	1 400	–	11,3	13	1 445	–1,3	–13,3	–3,2			
6	Okruh Jih–Poruba	15,5	15	1 895	–	15,1	13	1 966	–2,4	–13,3	–3,7			
7	Brno–Rousínov	22,0	20	3 553	90	21,4	21	3 547	–2,7	5,0	0,2			
8	Okruh Jih–Plesná	23,9	21	2 957	–	23,9	18	2 922	0,0	–14,3	1,2			
9	Rousínov–Brno	28,3	31	3 961	80	27,9	34	3 963	–1,4	9,7	0,1			
10	OvaJih–ŠenovNJ	34,1	38	4 649	–	33,4	36	4 439	–2,1	–5,3	4,5			
11	Rousínov–Přerov	61,4	41	9 574	100	61,1	41	9 550	–0,5	0,0	0,3			
12	Přerov–Rousínov	64,1	52	8 425	80	63,3	44	10 383	<i>Porucha vozidla na trase</i>					
13	Přerov–Ostrava	70,5	54	9 882	80	69,6	62	9 290	–1,2	14,8	6,0			
14	Poruba4–Přerov	75,3	57	11 012	90	72,6	57	11 090	–3,7	0,0	–0,7			

Tabulka se dělí na část vypočtenou algoritmem, část vyhodnocenou z telemetrie vozidla a výpočet odchylky porovnáním těchto dvou částí. V části Vypočítané hodnoty trasy figuruje sloupec Maximální rychlosti, který znázorňuje omezení z důvodu optimalizace toku energií, jak bylo vysvětleno v kapitole 7.4.5. Tato rychlost byla na zvolené trase maximální rychlostí a při jejím dlouhodobém překročení hrozilo uvíznutí na trase. Tabulka je řazena vzestupně podle vypočítané délky trasy. Chybové hodnoty jsou záporné, pokud naměřená data jsou menší než data vypočítaná algoritmem. Konkrétně pokud byla ujeta menší vzdálenost než byla vypočtena, byl na trase stráven menší čas nebo bylo spotřebováno méně energie.

## 8.2 Diskuze výsledků

V horní polovině tabulky 8.1, ve které jsou trasy seřazeny dle své délky, figurují pouze cesty v rámci okresu Ostrava. Tyto krátké trasy jsou do značné míry ovlivněny dopravou, zejména hustotou provozu v městské aglomeraci, která v algoritmu není zohledněna jinak než průměrnou rychlostí v každém segmentu. Tato skutečnost společně s obecně nižší tolerancí krátkých tras k anomáliím způsobuje v některých případech značnou odchylku, a to jak času, tak spotřeby.

### 8.2.1 Krátké trasy

Nejlepších výsledků z tras naměřených v rámci okresu dosahovaly okružní jízdy. První okruh (trasa 6 v tabulce 8.1) začínal u dobíjecí stanice ČEZu u čerpací stanice Benzina na ulici Rudné v Ostravě západním směrem, pokračoval až do městské části Ostrava-Poruba, kde byl využit sjezd na Klimkovice k otočení a zpátky pokračoval až na sjezd na Příbor, kde došlo k dalšímu otočení a následně k dokončení okruhu. Druhý okruh (trasa 8 v tabulce 8.1) byl prodloužen a místo otočení u sjezdu na Klimkovice byl využit až sjezd na městskou část Plesná. Oba okruhy neobsahovaly jakékoliv řízené křižovatky, či jiné chybu zanášející prvky. Při delším okruhu byla poprvé otestována implementace výpočtu hustoty vzduchu, díky čemuž odchylka klesla na 1,2 %, což značí 33 Wh rozdíl mezi odhadovanou a reálnou spotřebou.

Trasa 10 v tabulce 8.1 byla cesta do městské části Šenov v Novém Jičíně. Spotřeba na trase dlouhé 33,4 km byla vypočtena s odchylkou 4,5 % tedy 210 Wh. Tato odchylka byla způsobena silným větrem, který není možno efektivně zpracovat (viz kapitola 7.5.2).

### 8.2.2 Dlouhé trasy využívající optimalizace toků energií

Pro účely měření a ověření funkcionality byla podniknuta dlouhá trasa z Ostravy do Brna a zpět s celkem 4 zastávkami pro rychlodobíjení a převahou dálnic. Trasa začínala ráno 14. 4. 2021 s plně nabitým vozidlem v kampusu VŠB v Ostravě-Porubě. Přidaná hmotnost je 160 kg a SoH 89 %.

Vzhledem k absenci rychlodobíjecích stanic na trase bylo nutno dojet až do 75 km vzdáleného Přerova (trasa 14 v tabulce 8.1). Při maximální rychlosti by pro tuto trasy bylo potřeba téměř 17 476 Wh, což je vzhledem k množství uložené energie maximálně 13 257 Wh vysoce nad možnost vozidla. I trasu ujetou průměrnou rychlostí algoritmus vyhodnotil jako nedosažitelnou, a proto byl aktivován režim optimalizace toků energií a byla vypočítána maximální rychlost na trase. Ta nedoporučovala řidiči překračovat rychlost 90 km/h. S tímto doporučením byla trasa úspěšně dokončena. Odchylka spotřeby byla přibližně -0,7 %.

Dalším úsekem této trasy byla cesta z Přerova do Rousínova (trasa 12 v tabulce 8.1), kde algoritmus nedoporučil cestovat rychleji než 80 km/h. Ačkoliv je tento úsek kratší, je rovněž kopcovitý. Terénní faktor v kombinaci s nepraktičností dobíjení vozidla nad 85 % SoC způsobil vyšší omezení. Trasa bohužel skončila cca 600 m před dobíjecí stanicí na sjezdu z dálnice D1 na Rousínov. Chybou nebyl nedostatek energie v akumulátoru, ale kombinace vysoké teploty v trakčním akumulátoru a nízkého napětí jednoho z článků. SoC při zastavení vozidla bylo 15 %, zobrazovaný dojezd 5 km. Z poznatků z kapitoly 7.4.2 je známo že, k zastavení vozidla dochází až při hodnotách SoC od 7 do 0,5 %. Po odtažení k nedaleké dobíjecí stanici byla trasa vyhodnocena. Odchylka spotřeby energie byla celých 23,2 %, což bylo zaviněno jednak dlouhým čekáním na odtah, a hlavně krátkými energeticky náročnými pojezdy na sjezdu dálnice a u dobíjecí stanice.

Po dobití trasa pokračovala do Brna, kde nebylo v úmyslu dobíjet. Trasa 9 v tabulce 8.1 z Rousínova do Brna byla vyhodnocena s rekordně nízkou odchylkou 0,05 %. To je způsobeno jednak doporučením algoritmu na cestování maximálně 80 km/h rychlostí, ale zejména velmi defenzivním stylem jízdy pramenícím z vysoké teploty trakčního akumulátoru.

Trasa 7 v tabulce 8.1 z Brna do Rousínova algoritmus nastavil omezení rychlosti na 90 km/h. Odchylka vypočítané a naměřené spotřeby byla 0,17 %. V tomto úseku měl vestavěný algoritmus odchylku ukazatele dojezdu přes 90 %. Kompletní srovnání následuje v kapitole 8.4.

Po nabití na 90 % SoC bylo možno ujet kopcovitý úsek z Rousínova do Přerova (trasa 11 v tabulce 8.1) 100 km/h rychlostí. Na konci trasy byla odchylka odhadu spotřeby 0,25 %.

Na nejdelší úsek, trasa 13 v tabulce 8.1 z Přerova do Ostravy bylo potřeba nabít na 96 % SoC, a díky zvýšené pasivní spotřebě vlivem přicházejícího soumraku a předpokládaných srážek omezit rychlost na 80 km/h. Na většině trasy se skutečně vyskytovaly smíšené srážky. Odhad algoritmu nyní naplno využil potenciál informací o předpovědi počasí. Do cíle 330 km dlouhé trasy se povedlo dorazit s naměřenou odchylkou 6 %. Ta byla zřejmě způsobena sníženým aerodynamickým odporem vlivem jízdy za nákladním vozidlem.

### 8.3 Analýza měření

Aplikace caniOn byla vyvíjena v roce 2011 na soudobé technice. V těchto letech byly mobilní zařízení vybaveny technologií Bluetooth ve verzi 3.0. Tato verze má zásadní funkční

rozdíly oproti modernějším verzím 4.0 a výše zejména ve způsobu komunikace a uspávání. Vlivem těchto změn jsou moderní mobilní zařízení neschopna udržet setrvalou komunikaci mezi aplikací caniOn a diagnostikou OBDLink LX. To způsobuje výpadky v komunikaci a nenahraditelnou ztrátu dat. Pro potřeby přesného měření byl zakoupen tablet Nexus 7, na kterém byla aplikace vyvíjena. V této kombinaci byly výpadky komunikace omezeny na minimum, ale stále jsou významnou chybou zejména na krátkých trasách. Vzhledem ke shlukovité a nahodilé povaze výpadků, není možno hodnoty jakkoliv nahradit. Extrapolace má smysl pouze tehdy, pokud se výpadek vyskytl na místě s konstantní spotřebou (například dálnice, rovný úsek silnice bez provozu aj.). Tyto výpadky vnášely značnou chybu do většiny měření. Větší četností chyb bylo zapříčiněno i zkrácení a restartování měření trasy Přerov–Ostrava (trasa 11 v tabulce 8.1).

## 8.4 Srovnání CMRE s vnitřním algoritmem vozidla RR

Díky zaznamenávání parametru RR (z anglického remaining range – zbývající dojezd) lze z vnitřní diagnostiky vozidla porovnat odchylky výpočtu dojezdu a porovnat je s odchylkami CMRE algoritmu.

Jak bylo popsáno v kapitole 4.3, není známo, na jaké bázi vozidlo RR vypočítává, ale je známá silná závislost na jízdním stylu předcházejícím výpočtu.

V tabulce 8.2 jsou porovnány odhady vozidla a odhady CMRE algoritmu z vyhodnocovaných tras z předchozí kapitoly, tabulky 8.1.

Jelikož CMRE algoritmus nevypočítává dojezd, ale soustředí se na dojetí do cíle trasy a optimalizuje zbývající energii, nemá k dispozici číselný údaj dojezdu podobný jako RR. Pro potřeby srovnání algoritmů byla spočtena průměrná spotřeba na každé z tras a odchylka energie byla podělena touto spotřebou. Výpočet popisuje rovnice 8.1. Údaje pro dosažení jsou převzaty z tabulky 8.1.

$$\Delta d_{CMRE} = \frac{\Delta E_{end}}{\frac{E_{tot}}{d_{tot}}}, \quad (8.1)$$

kde  $\Delta d_{CMRE}$  je odchylka naměřené vzdálenosti vůči vypočtené vzdálenosti v *km*,

$\Delta E_{end}$  je odchylka naměřené energie vůči vypočtené energii na konci trasy ve *Wh*,

$E_{tot}$  je celková spotřebovaná energie na trase ve *Wh*

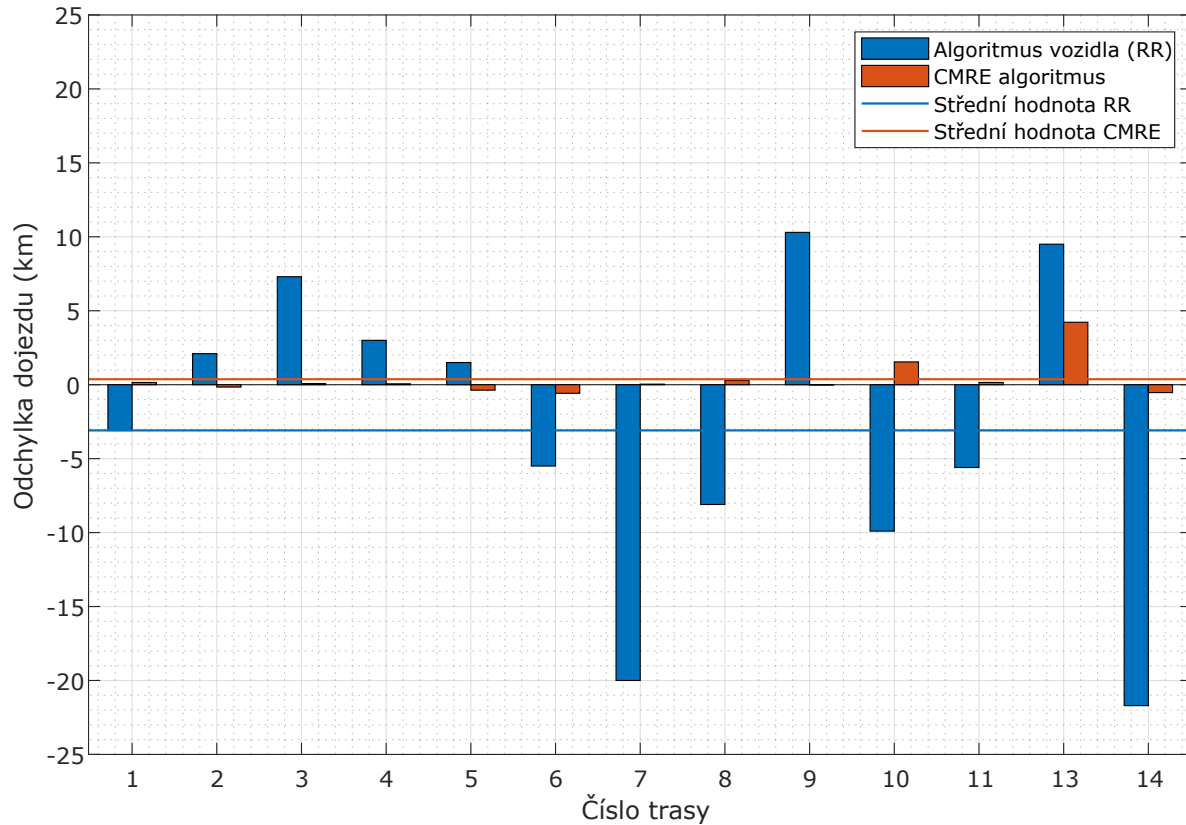
a  $d_{tot}$  je délka trasy v *km*.

Procentuální odchylka RR byla v dřívějších kapitolách popsána jako desítky procent, a i v tomto případě se objevila odchylka až 90,9% na trase č. 7. Tato odchylka je způsobena předcházející úspornou jízdou z kopce u Rousínova do Brna a zmíněnou trasou opačným směrem tedy do kopce poměrně vysokou rychlostí.

Tabulka 8.2: Porovnání výstupu z CMRE algoritmu s algoritmem výpočtu dojezdu vozidla.

Číslo trasy	Parametry trasy			Algoritmus výpočtu dojezdu vozidla (RR)				CMRE algoritmus	
	Jméno trasy (Start-Cíl)	Délka trasy (km)	Počáteční RR (km)	Cílové RR (km)	Změna RR (km)	RR odch. vzdálenosti (km)	RR odch. vzdálenosti (%)	CMRE odch. vzdálenosti (km)	CMRE odch. vzdálenosti (%)
1	OvaJih-Poruba1	7,9	71	60	11	-3,1	-39,2	0,15	1,9
2	OvaJih-Poruba1	8,1	49	43	6	2,1	25,9	-0,16	-2,0
3	Poruba1-Centrum	9,3	43	41	2	7,3	78,5	0,08	0,9
4	Poruba8-OvaJih	11,0	65	57	8	3	27,3	0,06	0,5
5	Petřkovice-OvaJih	11,5	94	84	10	1,5	13,0	-0,37	-3,2
6	Okruh Jih-Poruba	15,5	77	56	21	-5,5	-35,5	-0,58	-3,7
7	Brno-Rousínov	22,0	62	20	42	-20	-90,9	0,04	0,2
8	Okruh Jih-Plesná	23,9	90	58	32	-8,1	-33,9	0,28	1,2
9	Rousínov-Brno	28,3	80	62	18	10,3	36,4	-0,01	-0,1
10	OvaJih-ŠenovNJ	34,1	81	37	44	-9,9	-29,0	1,54	4,5
11	Rousínov-Přerov	61,4	81	14	67	-5,6	-9,1	0,15	0,3
13	Přerov-Ostrava	70,5	88	27	61	9,5	13,5	4,22	6,0
14	Poruba4-Přerov	75,3	106	9	97	-21,7	-28,8	-0,53	-0,7

Na obrázku 8.1 je vyjádřena absolutní odchylka v kilometrech a na obrázku 8.2 relativní odchylka v procentech. Oba grafy prezentují, že CMRE je ve svých výpočtech spotřebované energie, a tedy dojezdu, daleko přesnější, a to jak na krátkých trasách, tak na trasách za hranicí reálného dojezdu vozidla, tedy v situaci, kdy je potřeba optimalizovat toky energií. Grafy nezahrnují výše zmíněnou trasu 12, kvůli poruše vozidla na trase.

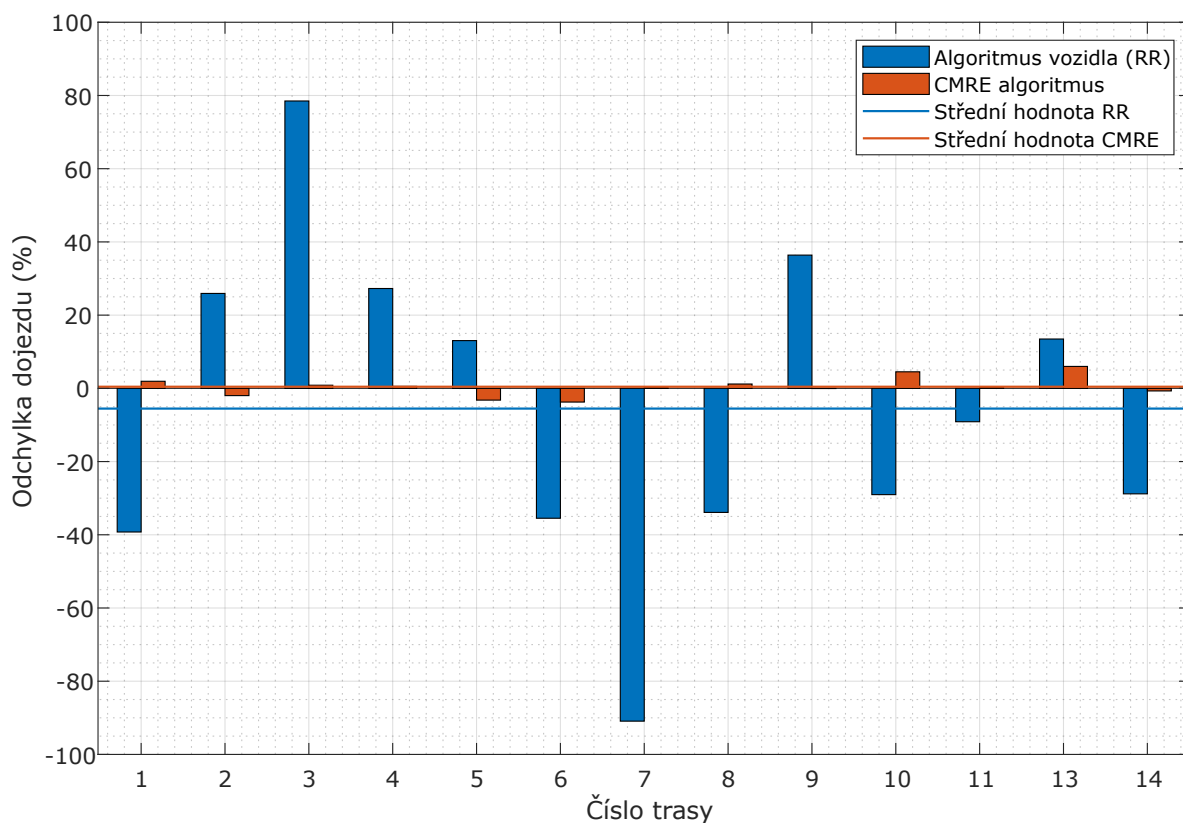


Obrázek 8.1: Srovnání absolutních hodnot odchylek dojezdu CMRE a RR vybraných tras.

Z grafů je možno pozorovat, že odchylky výpočtu RR mají kladné i záporné hodnoty. To vyplývá z dříve popsané závislosti na spotřebě při jízdě předcházející měření. Naopak u CMRE je pozorovatelné, že u většiny odchylek (9 ze 13) je kladná hodnota, což znamená, že v akumulátoru zbývalo více energie, než mělo, tedy že algoritmus je navržen defenzivně. Extrémním případem je trasa 13, při které došlo k úspoře 4,22 km, a to z důvodů, že CMRE algoritmus předpokládal déšť po celé trase, což se nesplnilo, a také nedokázal započíst snížení aerodynamického odporu vlivem jízdy za velkými vozidly. Toto snižování odporu nebylo úmyslné, bylo dáno shodnou rychlostí.

Největší záporná odchylka CMRE je 0,58 km (trasa č.6). To znamená, že v akumulátoru oproti výpočtu chyběla energie k ujetí 580 m. V rámci algoritmu byla zvolena rezerva 2 % SoC, což znamená přibližně 1,5–3 km dle stylu jízdy. Z toho vyplývá, že zvolená a uživatelsky nastá-





Obrázek 8.2: Srovnání relativních hodnot odchylek dojezdu CMRE a RR vybraných tras.

vitelná rezerva pokrývá i nejvyšší detekovanou zápornou odchylkou, a to s násobnou rezervou. Další, i když nespolehlivou rezervou, je režim „želvy“, kdy vozidlo stále jede byt s omezením maximální rychlosti a akcelerace. Toto omezení se zvyšuje nepřímo úměrně klesajícímu SoC a aktivuje se od 6 do 0,5 %, dle stavu trakčního akumulátoru. Další rezerva je tedy 1–6 km.

V tabulce 8.3 je uvedeno statistické srovnání odchylek výpočtu dojezdu pro vnitřní algoritmus vozidla (RR) a CMRE algoritmus jak v absolutních, tak v relativních hodnotách.

Tabulka 8.3: Statistické porovnání CMRE algoritmu s algoritmem výpočtu dojezdu vozidla.

Srovnávací metoda	Algoritmus výpočtu dojezdu vozidla (RR)		CMRE algoritmus	
	Absolutní hodnoty (km)	Relativní hodnoty (%)	Absolutní hodnoty (km)	Relativní hodnoty (%)
Střední hodnota	-3,09	-5,53	0,37	0,44
Median	-3,10	-9,12	0,06	0,25
Průměrná odchylka	8,04	35,04	0,77	1,90
Rozptyl	95,90	1755,75	1,49	6,83
Směrodatná odchylka	9,79	41,90	1,22	2,61
Výběrová směr. odch.	10,19	43,61	1,27	2,72

Všechna provedená srovnání včetně základní statistické analýzy algoritmů výpočtu dojezdu implementovaném ve vozidle (RR) proti vyvinutému algoritmu CMRE na vyhodnocovaných trasách ukazují, že CMRE má z pohledu chyby řádově lepší odhad spotřebované energie, a tedy dojezdu, než algoritmus implementovaný ve vozidle.

Úmyslem CMRE, který se prokázal jako funkční, je, že i při výskytu záporné odchylky, tedy chybějící energii, od reálné vzdálenosti se díky nastavitelným limitům algoritmu a rezervám energie v akumulátoru vždy povede dojet do cíle.

Kdyby řidič spoléhal na údaj RR odhadnutý a zobrazený vozidlem, zůstal by na těchto 13 vyhodnocovaných trasách 5 krát uvězněn na dálnici s vybitým vozidlem. V tolika případech musela být, kvůli nedostatku energie pro dojezd do cíle průměrnou rychlostí na trase, aktivována část algoritmů s řízením toků energií – hlavním přínosem této práce.

# Kapitola 9

## Závěr

Má práce se odvíjela od cílů, schválených komisí v rámci státní oktorské zkoušky a to:

1. Vytvoření modelu dojezdu BEV pro CMRE algoritmus.
2. Vytvoření CMRE algoritmu, který dokáže spolehlivě odhadnout dojezd elektromobilu a také vyhodnotit několik tras dle zvoleného optimalizačního kritéria.
3. Realizaci vlastního přístupu k řízení toků energií a jejich aplikaci pro možnou úsporu energie v rámci vyvinutého CMRE algoritmu.

Cílem, který předcházela takto komplexním úlohám bylo zmapování současného stavu vědění o elektromobilech v kapitole 3 a reserši současného poznání v kapitole 4. Tyto kapitoly sdružují znalosti o elektromobilitě a dávají základ pro směřování této práce i budoucího výzkumu.

Všechny výše uvedené cíle byly postupně v práci splněny. Z mého pohledu je přínos práce a navrženého vlastního CMRE algoritmu následující: Stávající algoritmy pro výpočet dojezdu v BEV většinou pracují pouze s historickými daty spotřeby a aktuální uloženou energií v trakčním akumulátoru. Tento způsob výpočtu dojezdu je správný pouze v případě, kdy naplánovaná trasa bude kopírovat historickou trasu ve shodných podmínkách, což je prakticky nemožné. CMRE algoritmus nebere v úvahu minulost, ale díky mapovým podkladům (modelu trasy a počasí), informacím od uživatele a modelu BEV je schopen vypočítat budoucí spotřebu na trase a tím i stav akumulátoru v každém bodě trasy. Tím sofistikovaně řeší jak dojetí do cíle trasy, tak hill hazard – fenomén, který přichází společně s elektromobilitou.

CMRE zároveň dovede řídit toky energií. Díky omezení rychlosti dává řidiči možnost absolvovat trasu, kterou by běžnou rychlostí absolvovat nemohl, za čas, který je výhodnější než kombinace vysoké rychlosti a dobíjecího času. Právě zkombinováním přesných výpočtů a řízením toků energií CMRE vyniká v optimalizaci navržených tras.

Právě díky přesnosti a spolehlivosti CMRE algoritmu se revolučně zlepšuje využitelnost BEV s malým trakčním akumulátorem. Není potřeba vyrábět velké, těžké, drahé BEV se

spornou ekologickou návratností. Je možno přejít k racionálně navrženým BEV s menší uložitelnou energií v akumulátoru a implementaci CMRE algoritmu. Řidič se tak nebude muset spoléhat na své „expertní“ znalosti vozu, trasy a vlivu počasí a s obavami sledovat měnící se číselný údaj dojezdu. Místo stresujícího čísla bude mít před sebou ukazatel napojený na CMRE zobrazující barvy semaforu. Zelená – Jed! Žlutá – Pozor! Zvolni! Červená – tímhle stylem jízdy nedojeďeš! Výrazně uprav jízdni styl, nebo naplánuj dobíjení na cestě.

Věřím, že rozsáhlá rešeršní část na začátku práce poslouží jako soubor faktů podepřených daty a pomůže k potírání dezinformací a bude odrazovým můstkem k dalšímu výzkumu BEV na českých univerzitách. Dále věřím, že můj CMRE algoritmus bude dále rozvíjen, zlepšován, a že se stane volně dostupným nástrojem pro výpočet dojezdu elektromobilů a řízení toků energií, který dokáže konkurovat uzavřeným algoritmům měření dojezdu v soudobých BEV. A konečně doufám, že touto prací přispějí k nenásilné adaptaci elektromobility, zlepšení lokálních dopadů dopravy na zdraví, energetické stabilitě a nezávislosti.

Elektronickou přílohou této práce jsou veškeré kódy potřebné pro rekonstrukci plné funkcionality CMRE včetně kódu pro program Speedgetter.

## 9.1 Budoucí výzkum

Mým záměrem je praktické nasazení algoritmu do funkce BEV, jeho rozšíření a nahrazení služeb jako je ABRP<sup>1</sup> z důvodu jejich suboptimálních výsledků. Výstupem by tak mohla být kombinace HW diagnostiky do OBD konektoru vozidla a aplikace pro mobilní zařízení.

Implementace celého algoritmu do mobilního zařízení by umožnila jednak online dotazování na různá API, ale také čtení dat přímo z vozidla. To je zásadní nejen pro přesné zadání vstupních dat, ale také pro cyklické provádění algoritmu ve vozidle. Sledování online dat z vozidla dává možnost identifikovat hmotnost, a to buď z tlaku pneumatik, jak řešila publikace (Fechtner et al., 2015) nebo z druhého Newtonova zákona, jak bylo popsáno v (Wilhelm et al., 2013). Znalost teploty akumulátoru z diagnostických dat umožňuje predikovat dobu a výkon plánovaného dobíjení.

Další zlepšení by mohla přinést spolupráce s VUT a identifikace termodynamických jevů v sekundárních člancích do výpočtu algoritmu. Drobným vylepšením by mohl být i přesný výpočet tíhového zrychlení na plánované trase. Naopak významné zpřesnění by přineslo rozsáhlé měření TTW účinnosti v malých výkonech a při různých teplotách.

Díky projektu e-Town mohu své znalosti implementovat do praktického projektu a využít tohoto algoritmu pro přesný výpočet dojezdu malých BEV často označovaných jako mikroelektromobilita.

---

<sup>1</sup>Jedná se o online službu a aplikaci pro mobilní zařízení, které dovedou vypočítat dojezd a naplánovat trasu BEV na základě vstupních dat od uživatele.

# Literatura

- ANDERSON, Curtis D., 2010-03-30. *Electric and Hybrid Cars*. McFarland. ISBN 0786433019. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/8632420/curtis\\_d\\_anderson\\_electric\\_and\\_hybrid\\_cars.html](https://www.ebook.de/de/product/8632420/curtis_d_anderson_electric_and_hybrid_cars.html).
- ASAKURA, Kaoru; SHIMOMURA, Makoto; SHODAI, Takahisa, 2003. Study of life evaluation methods for Li-ion batteries for backup applications. *Journal of Power Sources*. Roč. 119-121, s. 902–905. Dostupné z DOI: 10.1016/s0378-7753(03)00208-8.
- AUTO-DATA, 2021a. *2019 Renault Clio V 1.3 TCe (130 Hp) EDC | Technical specs, data, fuel consumption, Dimensions* [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/renault-clio-v-1.3-tce-130hp-edc-36963>.
- AUTO-DATA, 2021b. *2019 Renault Clio V 1.5 Blue dCi (115 Hp) | Technical specs, data, fuel consumption, Dimensions* [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/renault-clio-v-1.5-blue-dci-115hp-36965>.
- BABORSKÝ, Jiří; SLOVÁČEK, Petr, 2020. *Požáry elektromobilů: Opravdu jsou tak nebezpečné? A co na to hasiči?* [auto.cz] [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: [https://www.auto.cz/pozary-elektromobilu-opravdu-jsou-tak-nebezpecne-a-co-na-to-hasici-132775?fbclid=IwAR2ieo4Gkrn9ghK53\\_b0GSLkJwbT0CyAe0YI\\_\\_dLH89zfSclb8\\_H09EwBfA](https://www.auto.cz/pozary-elektromobilu-opravdu-jsou-tak-nebezpecne-a-co-na-to-hasici-132775?fbclid=IwAR2ieo4Gkrn9ghK53_b0GSLkJwbT0CyAe0YI__dLH89zfSclb8_H09EwBfA).
- BAUER, Christian; HOFER, Johannes; ALTHAUS, Hans-Jörg; DUCE, Andrea Del; SIMONS, Andrew, 2015. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy*. Roč. 157, s. 871–883. Dostupné z DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.019.
- BODEN, T.; ANDRES, R.; MARLAND, G., 2017. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions (1751 - 2014) (V. 2017)*. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Dostupné z DOI: 10.3334/CDIAC/00001\_V2017.

- BUGGA, Ratnakumar V.; SMART, Marshall C.; WHITCANACK, Larry, 2010. Storage Characteristics of Lithium-Ion Cells. *ECS Transactions*. Roč. 25, č. 36, s. 297–306. Dostupné z DOI: 10.1149/1.3393865.
- BURKERT, Andreas, 2018. Effective Recycling of Electric-vehicle Batteries. *ATZ worldwide*. Roč. 120, č. 9, s. 10–15. Dostupné z DOI: 10.1007/s38311-018-0139-z.
- BURKOVIC, Radovan, 2018. *Zkušenosti s elektromobilem Peugeot iOn po 4 letech: užíváme si elektromobility* [Hybrid.cz] [online]. 2018-04 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/zkusenosti-s-elektromobile-peugeot-ion-po-4-letech-uzivame-si-elektromobility>. Publisher: Jan Horčík.
- CARADVICE, 2020-08-23. *Which electric car has the best battery warranty?* | CarAdvice [CarAdvice.com] [online]. 2020-08-23 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.caradvice.com.au/859099/electric-car-battery-warranty/>.
- CARLETON, R. Nicholas, 2016. Into the unknown: A review and synthesis of contemporary models involving uncertainty. *Journal of Anxiety Disorders*. Roč. 39, s. 30–43. Dostupné z DOI: 10.1016/j.janxdis.2016.02.007.
- CARLOGOS, 2020. *14 Safest Car Brands In The World* [Carlogos.org] [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.carlogos.org/reviews/safest-car-brands-in-the-world.html>.
- CARLSON, Richard Barney; LOHSE-BUSCH, Henning; DIEZ, Jeremy; GIBBS, Jerry, 2013. The Measured Impact of Vehicle Mass on Road Load Forces and Energy Consumption for a BEV, HEV, and ICE Vehicle. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. Roč. 2, č. 1, s. 105–114. Dostupné z DOI: 10.4271/2013-01-1457.
- CDV, 2021. *V roce 2020 bylo v ČR registrováno přes 5 tisíc nových osobních elektrických vozidel* | Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. [Online] [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: [https://www.cdv.cz/tisk/v-roce-2020-bylo-v-cr-registrovano-pres-5-tisic-novych-osobnich-elektrickyh-vozidel/?fbclid=IwAR25\\_FVLDewWbzmMzP88DT0i9ZK6ZJmm-5vKFxajvXuvYGJAFpxep3-UK9o](https://www.cdv.cz/tisk/v-roce-2020-bylo-v-cr-registrovano-pres-5-tisic-novych-osobnich-elektrickyh-vozidel/?fbclid=IwAR25_FVLDewWbzmMzP88DT0i9ZK6ZJmm-5vKFxajvXuvYGJAFpxep3-UK9o).
- CELNÍ SPRÁVA, 2021. *Statistická data z oblasti výroby, dopravy a dovozu minerálních olejů* | Celní správa ČR [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: [https://www.celnisprava.cz/cz/dane/statistiky/Stranky/mineraly.aspx?&p\\_SortBehavior=0&p\\_FileLeafRef=Vymer%5fSPD%5fM0%5f2019%5fSK%5f05%2epdf&p\\_Modified=20200608%2009%3a22%3a06&&PageFirstRow=1&&View=%7B460D060C-4790-45DF-85E4-B9E846D4F2BC%7D](https://www.celnisprava.cz/cz/dane/statistiky/Stranky/mineraly.aspx?&p_SortBehavior=0&p_FileLeafRef=Vymer%5fSPD%5fM0%5f2019%5fSK%5f05%2epdf&p_Modified=20200608%2009%3a22%3a06&&PageFirstRow=1&&View=%7B460D060C-4790-45DF-85E4-B9E846D4F2BC%7D).
- CERAOLO, M.; PEDE, G., 2001. Techniques for estimating the residual range of an electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Roč. 50, č. 1, s. 109–115. Dostupné z DOI: 10.1109/25.917893.

- ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2020. *Šetření průměrných cen vybraných výrobků - pohonné hmoty a topné oleje - časové řady* [Šetření průměrných cen vybraných výrobků - pohonné hmoty a topné oleje - časové řady] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/setreni-prumernych-cen-vybranych-vyrobku-pohonne-hmoty-a-topne-oleje-casove-rady>.
- ČEZ, 2020a. *Jak se stát zákazníkem* [Elektromobilita.cz] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <http://cs/jak-se-stat-zakaznikem>.
- ČEZ, 2020b. *Výroční zprávy* [ČEZ Distribuce] [online] [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/o-spolocnosti/vyrocnizpravy>.
- ČEZ, 2020c. *Zprávy o udržitelném rozvoji* [Skupina ČEZ - O Společnosti] [online] [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/ospol/fileexport/investori/vz-2020/vyrocnizprava-skupina-cez-2020.pdf>.
- ČEZ, 2021. *Ceníky | Podpora | Skupina ČEZ* [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/ceniky.html>.
- ČTK, 2020. *V panelových domech v Česku žijí v současnosti tři miliony lidí* [online] [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/v-panelovych-domech-v-cesku-ziji-v-soucasnosti-tri-miliony-lidi/1907088>.
- DAS, Rajib; THIRUGNANAM, Kannan; KUMAR, Praveen; LAVUDIYA, Rajender; SINGH, Mukesh, 2014. Mathematical Modeling for Economic Evaluation of Electric Vehicle to Smart Grid Interaction. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Roč. 5, č. 2, s. 712–721. Dostupné z DOI: 10.1109/tsg.2013.2275979.
- EV-DATABASE, 2015. *Ford Focus Electric* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1010/Ford-Focus-Electric>.
- EV-DATABASE, 2021. *Renault Zoe ZE50 R135* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1205/Renault-Zoe-ZE50-R135>.
- DE VROEY, Laurent; JAHN, Rafaël; OMAR, Noshin; VAN MIERLO, Joeri, 2015. Impact of smart charging on the EV battery ageing - Discussion from a 3 years real life experience. *World Electric Vehicle Journal* [online]. Vol. 7, no. 4, s. 613–620 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z DOI: 10.3390/wevj7040613.
- DEISS, Harald Dipl-Ing; FAKLER, Winfried Dr; KALTENBACH, Johannes Dr, 2004-09-02. *Verfahren zum Ermitteln der Reichweite eines Elektrofahrzeuges*. Něm. pat., 10302504A1. 2004-09-02 [cit. 2021-02-24].
- DESJARDINS, Jeff, 2016-10-26. *The Critical Ingredients Needed to Fuel the Battery Boom* [Visual Capitalist] [online]. 2016-10-26 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.visualcapitalist.com/critical-ingredients-fuel-battery-boom/>.

- DIB, Wissam; SERRAO, Lorenzo; SCIARRETTA, Antonio, 2011. Optimal control to minimize trip time and energy consumption in electric vehicles. In: *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/vppc.2011.6043133.
- DOMI, Yasuhiro; USUI, Hiroyuki; YAMAGUCHI, Kazuki; YODOYA, Shuhei; SAKAGUCHI, Hiroki, 2019-01-23. Silicon-Based Anodes with Long Cycle Life for Lithium-Ion Batteries Achieved by Significant Suppression of Their Volume Expansion in Ionic-Liquid Electrolyte. *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. Roč. 11, č. 3, s. 2950–2960 [cit. 2021-02-23]. ISSN 1944-8244. Dostupné z DOI: 10.1021/acsami.8b17123. Publisher: American Chemical Society.
- DUENSEFELD, 2021. *Savings of 4.8 t CO2 per ton of recycled batteries - Duesenfeld* [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: [https://www.duesenfeld.com/recycling\\_en.html](https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html).
- DUNN, J. B.; GAINES, L.; BARNES, M.; SULLIVAN, J.; WANG, M., 2012. *Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle* [online]. 2012-06 [cit. 2021-02-16]. Výzk. zpr. Transportation | Argonne National Laboratory. Dostupné z: <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/149.pdf>.
- DUNSHEATH, Percy, 1969-11-11. *A History of Electrical Power Engineering*. MIT PR. ISBN 026254007X. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/18889295/percy\\_dunsheath\\_a\\_history\\_of\\_electrical\\_power\\_engineering.html](https://www.ebook.de/de/product/18889295/percy_dunsheath_a_history_of_electrical_power_engineering.html).
- ECKSTEIN, Julian; LÜKE, Christopher; BRUNSTEIN, Frederik; FRIEDEL, Patrick; KÖHLER, Ulrich; TRÄCHTLER, Ansgar, 2016. A Novel Approach Using Model Predictive Control to Enhance the Range of Electric Vehicles. *Procedia Technology*. Roč. 26, s. 177–184. Dostupné z DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.024.
- EEA, 2020. *National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism — European Environment Agency* [online]. 2020-05 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/national-emissions-reported-to-the-unfccc-and-to-the-eu-greenhouse-gas-monitoring-mechanism-16>.
- EHSANI, Mehrdad (ed.), 2005. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. Boca Raton: CRC Press. Power electronics and applications series. ISBN 978-0-8493-3154-1.
- Electric power transmission and distribution losses (% of output) – Czech Republic | data*, 2016 [online] [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=CZ>.



- ELWERT, Tobias; RÖMER, Felix; SCHNEIDER, Kirstin; HUA, Qingsong; BUCHERT, Matthias, 2018. Recycling of Batteries from Electric Vehicles. In: *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Springer International Publishing, s. 289–321. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-69950-9\_12.
- EMADI, Ali, 2005-05-25. *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. CRC Press. ISBN 0824723619. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/4248908/ali\\_emadi\\_handbook\\_of\\_automotive\\_power\\_electronics\\_and\\_motor\\_drives.html](https://www.ebook.de/de/product/4248908/ali_emadi_handbook_of_automotive_power_electronics_and_motor_drives.html).
- Energetická bilance ČR – časové řady* [Energetická bilance ČR - časové řady], 2020 [online] [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/czso/ene\\_cr](https://www.czso.cz/csu/czso/ene_cr).
- Energy storage system in Amsterdam ArenA now live!* [Interreg Europe], 2018 [online]. 2018-07 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.interregeurope.eu/evenergy/news/news-article/3718/energy-storage-system-in-amsterdam-arena-now-live/>.
- EON, 2020. *Pro řidiče* [E.ON Drive] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.eon-drive.cz/pro-ridice/>.
- EPA, 2005-09-07. *How EPA Fuel-Economy Testing Works* [HowStuffWorks] [online]. 2005-09-07 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/fuel-economy/28004-epa-fuel-economy-explained.htm>.
- ERÚ – Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství v České republice za rok 2020, 2020 [online] [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/-/vydani-narodni-zpravy-energetickeho-regulacniho-uradu-o-elektroenergetice-a-plynarenstvi-v-ceske-republice-za-rok-2020>.
- EURONCAP, 2021a. *Euro NCAP Best in Class 2019 | Euro NCAP* [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com:443/en/ratings-rewards/best-in-class-cars/2019/>.
- EURONCAP, 2021b. *Safest Family Cars | Euro NCAP* [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com:443/en/ratings-rewards/safest-family-cars/>.
- EURONCAP, 2021c. *Safest Fleet Cars | Euro NCAP* [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com:443/en/ratings-rewards/safest-fleet-cars/>.
- EV-DATABAZE, 2019a. *Hyundai Kona Electric 64 kWh* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1204/Hyundai-Kona-Electric-64-kWh>.
- EV-DATABAZE, 2019b. *Peugeot iOn Battery Electric Vehicle*. Dostupné také z: <https://ev-database.org/car/1095/Peugeot-iOn>.
- EV-DATABAZE, 2021a. *EV-databaze* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1164/Renault-Zoe-ZE50-R110>.

- EV-DATABAZE, 2021b. *EV-databaze* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org>.
- EV-DATABAZE, 2021c. *SEAT Mii Electric* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1191/SEAT-Mii-Electric>.
- EV-DATABAZE, 2021d. *Skoda CITIGOe iV* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1190/Skoda-CITIGOe-iV>.
- EV-DATABAZE, 2021e. *Smart EQ fortwo coupe* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1230/Smart-EQ-fortwo-coupe>.
- EV-DATABAZE, 2021f. *Tesla Model S Plaid+* [EV Database] [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://ev-database.org/car/1406/Tesla-Model-S-Plaidplus>.
- EVVOLUMES, 2020. *EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database* [online] [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://www.ev-volumes.com/news/86364/>.
- FDRIVE, 2021a. *Elektrická Dacia Spring se pod 300 tisíc Kč dostane jen s pomocí dotace* [fDrive.cz] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/elektricka-dacia-spring-se-pod-300tisic-kc-dostane-jen-s-pomoci-dotace-5985>.
- FDRIVE, 2021b. *Nový a levný elektromobil Tesla nakonec dorazí mnohem dříve* [fDrive.cz] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/novy-levny-elektromobil-od-tesly-nakonec-dorazi-mnohem-drive-6372>.
- FECHTNER, Heiko; TESCHNER, Thomas; SCHMUELLING, Benedikt, 2015. Range prediction for electric vehicles: Real-time payload detection by tire pressure monitoring. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/ivs.2015.7225777.
- FEW, Sheridan; SCHMIDT, Oliver; OFFER, Gregory J; BRANDON, Nigel; NELSON, Jenny; GAMBHIR, Ajay, 2018. Prospective improvements in cost and cycle life of off-grid lithium-ion battery packs: An analysis informed by expert elicitations. *Energy Policy*. Roč. 114, s. 578–590.
- FRANKE, Thomas; KREMS, Josef F., 2013. What drives range preferences in electric vehicle users? *Transport Policy*. Roč. 30, s. 56–62. ISSN 0967-070X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.tranpol.2013.07.005.
- FRANKE, Thomas; NEUMANN, Isabel; BÜHLER, Franziska; COCRON, Peter; KREMS, Josef F., 2011. Experiencing Range in an Electric Vehicle: Understanding Psychological Barriers. *Applied Psychology*. Roč. 61, č. 3, s. 368–391. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1464-0597.2011.00474.x.

- FUGLEVIČ, Daniel, 2019. *Děsivý crash test mimo zavedené normy. Slisovaný Leaf si vedl překvapivě dobře* [AutoRevue.cz] [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/desivy-crash-test-mimo-zavedene-normy-slisovany-nissan-leaf-si-ale-vedl-prekvapive-dobre>.
- Gasoline consumption, 2021. *Gasoline consumption: Ford - Focus - Spritmonitor.de* [online] [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: [https://www.spritmonitor.de/en/overview/17-Ford/148-Focus.html?fueltype=2&constyear\\_s=2012&constyear\\_e=2016&power\\_s=95&power\\_e=130&gearing=1&exactmodel=ecoboost&powerunit=2](https://www.spritmonitor.de/en/overview/17-Ford/148-Focus.html?fueltype=2&constyear_s=2012&constyear_e=2016&power_s=95&power_e=130&gearing=1&exactmodel=ecoboost&powerunit=2).
- GAZETA, 2018. *Hyundai Kona 1.6 T-GDI hatch, technical specifications: dimensions, fuel consumption, power, speed, data, photos* [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: [https://www.gazeta-a.com/autocatalog/Hyundai/Kona/16\\_T-GDI/](https://www.gazeta-a.com/autocatalog/Hyundai/Kona/16_T-GDI/).
- GIBON, Thomas; CHION, Laurent, 2020. *Climobil* [online] [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://climobil.connecting-project.lu/>.
- GOLEMBIOVSKÝ, Matěj, 2016. *Balancovací systém pro elektrický motocykl*. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10084/115890>. Dipl. pr. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- GREENE, Suzanne; JIA, Haiying; RUBIO-DOMINGO, Gabriela, 2020. Well-to-tank carbon emissions from crude oil maritime transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Roč. 88, s. 102587. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trd.2020.102587.
- GRUBER, Paul W.; MEDINA, Pablo A.; KEOLEIAN, Gregory A.; KESLER, Stephen E.; EVERSON, Mark P.; WALLINGTON, Timothy J., 2011. Global Lithium Availability. *Journal of Industrial Ecology* [online]. Vol. 15, no. 5, s. 760–775 [cit. 2021-02-17]. ISSN 1530-9290. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x>. [\\_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x).
- GUARNIERI, Massimo, 2012. Looking back to electric cars. In: *2012 Third IEEE HISTory of ELECTRO-technology CONFERENCE (HISTELCON)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/histelcon.2012.6487583.
- HANLEY, Steve, 2019-06-03. *More Than 150 Gas Car Fires Per Day — Can We Please Get Serious About Electric Car Battery Fires?* [CleanTechnica] [online]. 2019-06-03 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2019/06/03/500-gas-car-fires-per-day-can-we-please-get-serious-about-electric-car-battery-fires/>.
- HAO, Han; MU, Zhexuan; JIANG, Shuhua; LIU, Zongwei; ZHAO, Fuquan, 2017. GHG Emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Sustainability*. Roč. 9, č. 4, s. 504.

- HARDMAN, Scott; JENN, Alan; TAL, Gil; AXSEN, Jonn; BEARD, George; DAINA, Nicolo; FIGENBAUM, Erik; JAKOBSSON, Niklas; JOCHEM, Patrick; KINNEAR, Neale; PLÖTZ, Patrick; PONTES, Jose; REFA, Nazir; SPREI, Frances; TURRENTINE, Tom; WITKAMP, Bert, 2018. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Roč. 62, s. 508–523. ISSN 1361-9209. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.002.
- HARPER, Gavin; SOMMERVILLE, Roberto; KENDRICK, Emma; DRISCOLL, Laura; SLATER, Peter; STOLKIN, Rustam; WALTON, Allan; CHRISTENSEN, Paul; HEIDRICH, Oliver; LAMBERT, Simon; ABBOTT, Andrew; RYDER, Karl; GAINES, Linda; ANDERSON, Paul, 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*. Roč. 575, č. 7781, s. 75–86. Dostupné z DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- HIGUCHI, Yoichiro; KOBAYASHI, Hiroyuki; SHAN, Zhiwei; KUWAHARA, Mikiharu; ENDO, Yoshiharu; NAKAJIMA, Yuha, 2017. Efficient Heat Pump System for PHEV/BEV. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE International. Dostupné z DOI: 10.4271/2017-01-0188.
- HOEKSTRA, Auke, 2019. The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. *Joule*. Roč. 3, č. 6, s. 1412–1414. Dostupné z DOI: 10.1016/j.joule.2019.06.002.
- HUMBERT, Guillaume, 2020. *Tesla Starts Battery Recycling And Swap Program* [Torque News] [online]. 2020-09 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.torquenews.com/11663/tesla-starts-battery-recycling-and-swap-program>.
- HYUNDAI, 2019. *Manuals & Warranties | Hyundai Resources | MyHyundai* [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://owners.hyundaiusa.com/content/myhyundai/us/en/resources/manuals-warranties.html>.
- HYUNDAI, 2021. *Konfigurátor | Hyundai Motor Czech s. r. o.* [HYUNDAI] [online]. 2021-02 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.hyundai.cz/konfigurator//13/0-0-0-0-0-0>.
- CHAN, Ching Chuen, 1993. An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*. Roč. 81, č. 9, s. 1202–1213. Dostupné z DOI: 10.1109/5.237530.
- CHEW, K. W.; YONG, Y. R., 2016. Effectiveness Comparison of Range Estimator for Battery Electric Vehicles. *Advances in Automobile Engineering*. Roč. 05, č. 01. Dostupné z DOI: 10.4172/2167-7670.1000128.
- CHEW, Kuew Wai; LEONG, C. K.; GOI, Bok Min, 2013. Contour Data Acquisition System for Electric Vehicle Distance Estimation Method. *Applied Mechanics and Materials*. Roč. 479-480, s. 503–507. Dostupné z DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.479-480.503.

- CHEW, Kuew Wai; LEONG, Chee Ken, 2014. Contour Data Acquisition System for Electric Vehicle Distance Estimation System. *Journal of Marine Science and Technology*. Roč. 22, č. 6, s. 700–704.
- CHO, Il; KIM, Woo Sung; KIM, Ho Gi; SUNG, Ki Taek; HA, Dong Gil; HWANG, Do Sung, 2012. *Method for estimating remaining travel distance of electric vehicle*. US20120143435A1. 2012-06 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20120143435A1/en?q=US+2012%2f0143435+A1>.
- IIHS-HLDI, 2020. *2020 Tesla Model 3 4-door sedan* [IIHS-HLDI crash testing and highway safety] [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.iihs.org/ratings/vehicle/tesla/model-3-4-door-sedan/2020>.
- IONITY, 2020. *How much does it cost to charge at IONITY?* [Online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://support.ionity.eu/en/general-questions/how-much-does-it-cost-to-charge-at-ionity>.
- ISIDORE, Chris, 2018-05-17. *Are electric cars more likely to catch fire?* [CNMONEY] [online]. 2018-05-17 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://money.cnn.com/2018/05/17/news/companies/electric-car-fire-risk/index.html>.
- JENŠÍKOVÁ, Jana, 2015. Pouliční světla budou multifunkční. *Tech Edu* [online] [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://techedu.cz/clanky/25/poulicni-svetla-budoucnosti-budou-multifunkcni>.
- JOHNSON, Scott K., 2020-09-24. *Here's what Tesla will put in its new batteries* [Ars Technica] [online]. 2020-09-24 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://arstechnica.com/cars/2020/09/heres-what-tesla-will-put-in-its-new-batteries/>.
- JOINT RESEARCH CENTRE, European Commission, 2020. *JEC WTT report V5: JEC well to wheels analysis: Well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Publications Office. Dostupné z DOI: 10.2760/959137.
- KANE, Mark, 2017. *Tesla Model S 100D Sets Production EV Range Record Of 1,078 km/670 Miles On Single Charge* [InsideEVs] [online]. 2017-08 [cit. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/332631/tesla-model-s-100d-sets-production-ev-range-record-of-1078-km-670-miles-on-single-charge/>.
- KANE, Mark, 2021. *Watch Volkswagen Start Electric Car Battery Recycling In Salzgitter* [InsideEVs] [online]. 2021-01 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/483097/volkswagen-start-battery-recycling-salzgitter/>.

- KIM, Hyung Chul; WALLINGTON, Timothy J.; ARSENAULT, Renata; BAE, Chulheung; AHN, Suckwon; LEE, Jaeran, 2016-07-19. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis. *Environmental Science & Technology* [online]. Roč. 50, č. 14, s. 7715–7722 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0013-936X. Dostupné z DOI: 10.1021/acs.est.6b00830. Publisher: American Chemical Society.
- KIRSCH, David A., 2000-08-31. *The Electric Vehicle and the Burden of History*. Rutgers University Press. ISBN 0813528097. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/3762647/david\\_a\\_kirsch\\_the\\_electric\\_vehicle\\_and\\_the\\_burden\\_of\\_history.html](https://www.ebook.de/de/product/3762647/david_a_kirsch_the_electric_vehicle_and_the_burden_of_history.html).
- KOPECKÝ, Pavel, 2020-09-09. Na Vinohradech lze dobíjet elektromobily ze sloupů veřejného osvětlení. *Pražský deník* [online] [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: [https://prazsky.denik.cz/zpravy\\_region/elektromobil-nabijecka-lampa-sloup-litacka-led-osvetleni.html](https://prazsky.denik.cz/zpravy_region/elektromobil-nabijecka-lampa-sloup-litacka-led-osvetleni.html).
- KUSHNIR, Duncan, 2015. *Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015*. Tech. zpr. Chalmers University of Technology.
- LI, Wen; STANULA, Patrick; EGEDE, Patricia; KARA, Sami; HERRMANN, Christoph, 2016. Determining the Main Factors Influencing the Energy Consumption of Electric Vehicles in the Usage Phase. *Procedia CIRP*. Roč. 48, s. 352–357. Dostupné z DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.014.
- LIU, Guangming; LU, Languang; LI, Jianqiu; OUYANG, Minggao, 2013. Thermal Modeling of a LiFePO Graphite Battery and Research on the Influence of Battery Temperature Rise on EV Driving Range Estimation. In: *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/vppc.2013.6671721.
- LTD, 2018. *Fair Cobalt Alliance (FCA)* [The Impact Facility] [online] [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.theimpactfacility.com/commodities/cobalt/fair-cobalt-alliance/>.
- MARTIN, Paul, 2017. *How Much Lithium is in a Li-Ion Vehicle Battery?* / *LinkedIn* [online] [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/how-much-lithium-li-ion-vehicle-battery-paul-martin/>.
- MCS, 2021. *MCS 2021-lithium*. Professional Paper. Dostupné také z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>. Series: Professional Paper.
- MELLIGER, M. A.; VLIET, O. P. R. van; LIIMATAINEN, H., 2018. Anxiety vs reality – Sufficiency of battery electric vehicle range in Switzerland and Finland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Roč. 65, s. 101–115. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trd.2018.08.011. cited By 0.

- MFCR, 2019. *Výsledek hospodaření státního rozpočtu v roce 2019 je o 11,5 mld. lepší než očekávání* [Ministerstvo financí České republiky] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.mfcr.cz/cs/aktualne/tiskove-zpravy/2020/pokladni-plneni-sr-37026>.
- MOM, Gijs, 2004-03-11. *The Electric Vehicle: Technology and Expectations in the Automobile Age*. JOHNS HOPKINS UNIV PR. ISBN 0801871387. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/4336219/gijs\\_mom\\_the\\_electric\\_vehicle\\_technology\\_and\\_expectations\\_in\\_the\\_automobile\\_age.html](https://www.ebook.de/de/product/4336219/gijs_mom_the_electric_vehicle_technology_and_expectations_in_the_automobile_age.html).
- MORO, Alberto; LONZA, Laura, 2018. Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Roč. 64, s. 5–14. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trd.2017.07.012.
- MRUZEK, Martin; GAJDÁČ, Igor; KUČERA, Luboš; BARTA, Dalibor, 2016. Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range. *Procedia Engineering*. Roč. 134, s. 165–174. Dostupné z DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.056.
- NEDC, 2013. *Addenda to the 1958 Agreement (Regulations 101-120) | UNECE* [online] [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120>.
- NEUBAUER, Jeremy; BROOKER, Aaron; WOOD, Eric, 2012. Sensitivity of battery electric vehicle economics to drive patterns, vehicle range, and charge strategies. *Journal of Power Sources*. Roč. 209, s. 269–277. ISSN 0378-7753. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.107.
- NEUBAUER, Jeremy; WOOD, Eric, 2014. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. *Journal of Power Sources*. Roč. 257, s. 12–20. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.075.
- NHTSA, 2016-06-10. *Ratings* [NHTSA] [online]. 2016-06-10 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.nhtsa.gov/ratings>. Last Modified: 2020-10-14T13:31:04:00.
- Overpass API*, 2021 [online] [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://overpass-api.de/>.
- PATINO, Joseph; NIGRO, Daniel M.; FISKE, II John D., 1993-08-31. *Method and apparatus for rapidly charging a battery at high temperature*. US pat., 5241259A. 1993-08-31 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5241259A/en>.
- PAUL, Topon Kumar; AISU, Hideyuki, 2012. *Electric vehicle charging scheduling system*. US20120245750A1. 2012-09 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20120245750A1/en?q=US20120245750+A1>.

- PEARRE, Nathaniel S.; KEMPTON, Willett; GUENSLER, Randall L.; ELANGO, Vetri V., 2011. Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Roč. 19, č. 6, s. 1171–1184. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.010.
- PILLER, Sabine; PERRIN, Marion; JOSSEN, Andreas, 2001. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*. Roč. 96, č. 1, s. 113–120. Dostupné z DOI: 10.1016/s0378-7753(01)00560-2.
- PORAMAPOJANA, P.; CHEN, B., 2012. Minimizing HEV fuel consumption using model predictive control. In: *Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, s. 148–153. Dostupné z DOI: 10.1109/MESA.2012.6275553.
- PRE, 2021a. *Chci dobíjet pravidelně | PREmobilita* [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.premobilita.cz/cs/dobijeni-elektromobilu/dobijeni-na-prepoint/chci-dobijet-na-prepoint/chci-dobijet-pravidelne/>.
- PRE, 2021b. *Pražská energetika upravuje ceny za dobíjení elektromobilů v síti PREpoint | PRE* [online]. 2021-01 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: [https://www.pre.cz/cs/profil-spolecnosti/media/tiskove-zpravy/prazska-energetika-upravuje-ceny-za-dobijeni-elektromobilu-v-siti-prepoint/?fbclid=IwAR3Tom8aYoZMhba\\_ieLgMn71SW0eyXwPKYdv9g4SgkJBt1bTqCuAikDHJI](https://www.pre.cz/cs/profil-spolecnosti/media/tiskove-zpravy/prazska-energetika-upravuje-ceny-za-dobijeni-elektromobilu-v-siti-prepoint/?fbclid=IwAR3Tom8aYoZMhba_ieLgMn71SW0eyXwPKYdv9g4SgkJBt1bTqCuAikDHJI).
- PROCHÁZKA, Martin, 2018. *Česko masové dobíjení elektromobilů zvládne, tvrdí energetici - Novinky.cz* [online]. 2018-02 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/ekonomika/clanek/cesko-masove-dobijeni-elektromobilu-zvladne-tvrdi-energetici-40059731>.
- Project OSRM*, 2021 [online] [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://project-osrm.org/>.
- PVMAGAZINE, 2020. *Australian state governments introduce tax on electric vehicles* [pv magazine International] [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2020/11/23/australian-state-governments-introduce-tax-on-electric-vehicles/>.
- RAHN, Christopher D.; WANG, Chao-Yang, 2013-02-01. *Battery Systems Engineering*. Wiley John + Sons. ISBN 1119979501. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/19458523/christopher\\_d\\_rahm\\_chao\\_yang\\_wang\\_battery\\_systems\\_engineering.html](https://www.ebook.de/de/product/19458523/christopher_d_rahm_chao_yang_wang_battery_systems_engineering.html).
- REDDY, Thomas, 2010-06-05. *Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition*. McGraw-Hill Education, dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/15264387/thomas\\_reddy\\_linden\\_s\\_handbook\\_of\\_batteries\\_4th\\_edition.html](https://www.ebook.de/de/product/15264387/thomas_reddy_linden_s_handbook_of_batteries_4th_edition.html).



- REUTERS, 2021-01-05. *Electric cars rise to record 54% market share in Norway* [the Guardian] [online]. 2021-01-05 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://www.theguardian.com/environment/2021/jan/05/electric-cars-record-market-share-norway>. Section: Environment.
- ROB CROSS, Roger Spencer, 2009-04-01. *Sustainable Gardens*. CSIRO PUB. ISBN 0643094229. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/7502834/rob\\_cross\\_roger\\_spencer\\_sustainable\\_gardens.html](https://www.ebook.de/de/product/7502834/rob_cross_roger_spencer_sustainable_gardens.html).
- ROD, Aleš, 2019. *Studie: Analýza spotřebního zdanění pohonných hmot v ČR / CETA* [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <http://eceta.cz/tz-analyza-spotrebniho-zdaneni-pohonnnych-hmot-v-cr/>.
- RODGERS, Lennon; FREY, Daniel; WILHELM, Erik, 2013. Estimating an Electric Vehicle's "Distance to Empty" Using Both Past and Future Route Information. In: *Volume 1: 15th International Conference on Advanced Vehicle Technologies; 10th International Conference on Design Education; 7th International Conference on Micro- and Nanosystems*. American Society of Mechanical Engineers. Dostupné z DOI: 10.1115/detc2013-12880.
- RODGERS, Lennon; ZOEPF, Stephen; PRENNINGER, Johann, 2014. Analysing the Energy Consumption of the BMW ActiveE Field Trial Vehicles with Application to Distance to Empty Algorithms. *Transportation Research Procedia*. Roč. 4, s. 42–54. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.004.
- ROMARE, Mia; DAHLLÖF, Lisbeth, 2017. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. *IVL*, s. 58.
- SAJADI-ALAMDARI, Seyed Amin; VOOS, Holger; DAROUACH, Mohamed, 2019. Nonlinear Model Predictive Control for Ecological Driver Assistance Systems in Electric Vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*. Roč. 112, s. 291–303. Dostupné z DOI: 10.1016/j.robot.2018.12.001.
- SARRAFAN, Kaveh; MUTTAQI, Kashem; SUTANTO, Danny, 2018. Real-time estimation of model parameters and state-of-charge of lithiumion batteries in electric vehicles using recursive least-square with forgetting factor. In: *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/pedes.2018.8707763.
- SARRAFAN, Kaveh; MUTTAQI, Kashem M.; SUTANTO, Danny, 2018. Real-time State-of-charge Tracking System Using Mixed Estimation Algorithm for Electric Vehicle Battery System. In: *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/ias.2018.8544613.

- SARRAFAN, Kaveh; MUTTAQI, Kashem M.; SUTANTO, Danny; TOWN, Graham E., 2017. An Intelligent Driver Alerting System for Real-Time Range Indicator Embedded in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Roč. 53, č. 3, s. 1751–1760. Dostupné z DOI: 10.1109/tia.2017.2658538.
- SARRAFAN, Kaveh; MUTTAQI, Kashem M.; SUTANTO, Danny; TOWN, Graham E., 2018. A Real-Time Range Indicator for EVs Using Web-Based Environmental Data and Sensorless Estimation of Regenerative Braking Power. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Roč. 67, č. 6, s. 4743–4756. Dostupné z DOI: 10.1109/tvt.2018.2829728.
- SARRAFAN, Kaveh; SUTANTO, Danny; MUTTAQI, Kashem M., 2017. An electric circuit based EV battery model for runtime prediction and state of charge tracking. In: *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/itec-india.2017.8333899.
- SARRAFAN, Kaveh; SUTANTO, Danny; MUTTAQI, Kashem M.; TOWN, Graham, 2017. Accurate range estimation for an electric vehicle including changing environmental conditions and traction system efficiency. *IET Electrical Systems in Transportation*. Roč. 7, č. 2, s. 117–124. Dostupné z DOI: 10.1049/iet-est.2015.0052.
- SAUTERMEISTER, Stefan; FALK, Max; BAKER, Bernard; GAUTERIN, Frank; VAILLANT, Moritz, 2018. Influence of Measurement and Prediction Uncertainties on Range Estimation for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Roč. 19, č. 8, s. 2615–2626. Dostupné z DOI: 10.1109/tits.2017.2762829.
- SCROSATI, Bruno, 2011. History of lithium batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*. Roč. 15, č. 7-8, s. 1623–1630. Dostupné z DOI: 10.1007/s10008-011-1386-8.
- SDA, 2021. SDA [online]. 2021-02 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://portal.sda-cia.cz/clanek.php?id=6680&v=m>.
- SHANKAR, Ravi; MARCO, James, 2013. Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions. *IET Intelligent Transport Systems*. Roč. 7, č. 1, s. 138–150. Dostupné z DOI: 10.1049/iet-its.2012.0114.
- SHIBATA, Seishiro; NAKAGAWA, Tsuguhiko, 2015. Mathematical Model of Electric Vehicle Power Consumption for Traveling and Air-Conditioning. *Journal of Energy and Power Engineering*. Roč. 9, č. 3. Dostupné z DOI: 10.17265/1934-8975/2015.03.006.
- SCHRADER, Stef, 2021. *It Costs Nearly \$16,000 to Replace a Tesla Model 3 Battery Pack* [The Drive] [online]. 2021-01 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.thedrive.com/tech/38915/it-costs-nearly-16000-to-replace-a-tesla-model-3-battery-pack>.

- SKOKAN, Radovan, 2021-01-15. *Nabíjanie elektromobilov zo sĺpov verejného osvetlenia spúšťa Sabinov a Dolný Kubín | MójElektromobil.sk* [MojElektromobil.sk] [online]. 2021-01-15 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.mojelektromobil.sk/nabijanie-elektromobilov-zo-stlpov-verejneho-osvetlenia-spustili-aj-v-sabinove/>.
- SKOŘEPA, Martin, 2019. *Spalovací auta hoří 11x častěji, než elektromobily. V ČR shořelo 0 elektroaut* [online] [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/spalovaci-auta-hori-55x-casteji-nez-elektromobily-v-cr-shorelo-0-elektroaut>.
- SOYLU, Seref, 2011-09-12. *Electric Vehicles - Modelling and Simulation*. IntechOpen. ISBN 9533074779. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/37060620/electric\\_vehicles.html](https://www.ebook.de/de/product/37060620/electric_vehicles.html).
- SPRITMONITOR.DE, 2021. *Diesel consumption: Renault - Clio - Spritmonitor.de* [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: [https://www.spritmonitor.de/en/overview/41-Renault/368-Clio.html?fueltype=1&fuelsort=1&power\\_s=114&power\\_e=116&powerunit=3](https://www.spritmonitor.de/en/overview/41-Renault/368-Clio.html?fueltype=1&fuelsort=1&power_s=114&power_e=116&powerunit=3).
- SPRITMONITOR.DE, 2021. *Gasoline consumption: 6,97 l/100km - Renault, Clio, Edition One TCe 130* [online] [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.spritmonitor.de/en/detail/1161543.html>.
- STATISTA, 2021a. *Norway: electric and hybrid cars number 2012-2020* [Statista] [online] [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/696187/electric-and-hybrid-cars-number-in-norway/>.
- STATISTA, 2021b. *Norway: electric car charging stations by type 2011-2020* [Statista] [online] [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/696548/number-of-electric-car-charging-stations-in-norway-by-type/>.
- STEHLÍK, Jakub, 2018-01-23. *Rozhovor: „Kvůli elektromobilům se nová elektrárna stavět nemusí“* [Autobible.cz] [online]. 2018-01-23 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/rozhovor-kvuli-elektromobilum-se-nova-elektrarna-stavet-nemusi/>.
- STURK, David; HOFFMANN, Lars; TIDBLAD, Annika Ahlberg, 2015. Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs. *Traffic Injury Prevention*. Roč. 16, č. sup1, S159–S164. Dostupné z DOI: 10.1080/15389588.2015.1015117.
- SUN, Peiyi; BISSCHOP, Roeland; NIU, Huichang; HUANG, Xinyan, 2020. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*. Roč. 56, č. 4, s. 1361–1410. Dostupné z DOI: 10.1007/s10694-019-00944-3.

- ŠURKALA, Milan, 2016. *Elektromobily: kolik potřebují Temelínů? - A co elektromobily v Evropě?* [Svetmobilne.cz] [online]. 2016-12 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://www.svetmobilne.cz/elektromobily-kolik-potrebuji-temelinu/4808-2>.
- TANNAHILL, Vincent R.; MASRUR, Md Abul; SUTANTO, Danny; MUTTAQI, Kashem M., 2015. Future vision for reduction of range anxiety by using an improved state of charge estimation algorithm for electric vehicle batteries implemented with low-cost microcontrollers. *IET Electrical Systems in Transportation*. Roč. 5, č. 1, s. 24–32. Dostupné z DOI: 10.1049/iet-est.2014.0013.
- TANNAHILL, Vincent R.; MUTTAQI, Kashem M.; SUTANTO, Danny, 2016. Driver alerting system using range estimation of electric vehicles in real time under dynamically varying environmental conditions. *IET Electrical Systems in Transportation*. Roč. 6, č. 2, s. 107–116. Dostupné z DOI: 10.1049/iet-est.2014.0067.
- TESLA, 2009. *Model S - Options by Year - Tesla Motors Club Wiki* [online] [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/teslamotorsclubwiki/home/model-s/options-by-year>.
- TESLA, 2021. *Supercharger / Tesla* [online] [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: [https://www.tesla.com/cs\\_CZ/supercharger](https://www.tesla.com/cs_CZ/supercharger).
- Tesla Battery Survey* [Google Docs], 2021 [online]. 2021-02 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: [https://docs.google.com/spreadsheets/d/t024bMoRiDPIDialGnuKPsg/edit?usp=embed\\_facebook](https://docs.google.com/spreadsheets/d/t024bMoRiDPIDialGnuKPsg/edit?usp=embed_facebook).
- VACULÍK, Martin, 2021. *Martin Vaculík a elektromobil: Tohle jste chtěli vidět!* [auto.cz] [online]. 2021-02 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/martin-vaculik-a-elektromobil-tohle-jste-chteli-videt-137989?fbclid=IwAR00P70Cq-nnPpCEi104pUQu0LJGzLhghLs3vqcMG3sQ0w6rbzps06Xvps>.
- VARGA, Bogdan; SAGOIAN, Arsen; MARIASIU, Florin, 2019. Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges. *Energies*. Roč. 12, č. 5, s. 946. Dostupné z DOI: 10.3390/en12050946.
- VW, 2019. *Volkswagen Volkswagen offers First Glimpse of Mobile Charging Station* [online]. 2019-01 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2018/12/the-first-power-bank-for-the-e-car.html>.
- WAGER, Guido; WHALE, Jonathan; BRAUNL, Thomas, 2016. Driving electric vehicles at highway speeds: The effect of higher driving speeds on energy consumption and driving range for electric vehicles in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Roč. 63, s. 158–165. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.060.
- WAKEFIELD, Ernest Henry, 1994. *History of the electric automobile: battery-only powered cars*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. ISBN 978-1-56091-299-6.

- WAKEFIELD, Ernest Henry, 1998. *History of the electric automobile: hybrid electric vehicles*. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers. ISBN 978-0-7680-0125-9.
- Weather API – OpenWeatherMap, 2021 [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://openweathermap.org/api>.
- WESTBROOK, Mike H., 2001-09-28. *The Electric Car*. Institution of Engineering a Technology. ISBN 0852960131. Dostupné také z: [https://www.ebook.de/de/product/6587482/mike\\_h\\_westbrook\\_the\\_electric\\_car.html](https://www.ebook.de/de/product/6587482/mike_h_westbrook_the_electric_car.html).
- WILHELM, Erik; RODGERS, Lennon; BORNATICO, Raffaele, 2013. Real-time electric vehicle mass identification. In: *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. IEEE. Dostupné z DOI: 10.1109/evs.2013.6914840.
- WLTP, 2017. *WLTPfacts.eu - Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure* [WLTPfacts.eu] [online] [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.wltpfacts.eu/>.
- WONG, J. Y., 1978. *Theory of ground vehicles*. 3rd ed. New York: John Wiley. ISBN 978-0-471-35461-1.
- WPVI, 2018-10-14. *Tesla's Model 3 named safest car ever made* [6abc Philadelphia] [online]. 2018-10-14 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://6abc.com/4481203/>. Section: technology.
- WWW.STATISTA.COM, 2016. *Number of passenger cars and commercial vehicles in use worldwide from 2006 to 2015 in (1,000 units)*. Dostupné také z: <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>.
- YANG, S. C.; LI, M.; LIN, Y.; TANG, T. Q., 2014. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Roč. 402, s. 41–48. Dostupné z DOI: 10.1016/j.physa.2014.01.062.
- YIN, Renshu; HU, Shuhan; YANG, Yang, 2019. Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production*. Roč. 227, s. 960–971.
- YU, K.; TAN, X.; YANG, H.; LIU, W.; CUI, L.; LIANG, Q., 2016. Model Predictive Control of Hybrid Electric Vehicles for Improved Fuel Economy. *Asian Journal of Control*. Roč. 18, č. 6, s. 2122–2135. Dostupné z DOI: 10.1002/asjc.1304.
- ZENKNER, Petr, 2016-11-23. *Veřejné osvětlení dosluhuje a jeho modernizace si žádá miliardy korun. Zajímá se o ni i ČEZ* [Hospodářské noviny (iHNed.cz)] [online]. 2016-11-23 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://ihned.cz/c1-65528230-osvetleni-mest-si-zada-miliardy-zajima-se-o-ne-take-cez>. Section: HN.

## Autorovy publikace k tématu práce

- DEDEK, Jan, 2016. *Řídicí a informační systém pro elektrické jednostopé vozidlo*. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10084/115925>. Dipl. pr. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- DEDEK, Jan; DOCEKAL, Tomas; OZANA, Stepan; SIKORA, Tadeusz, 2019. BEV Remaining Range Estimation Based on Modern Control Theory - Initial Study. *IFAC-PapersOnLine*. Roč. 52, č. 27, s. 86–91. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.738. Cited by 1; Indexed by Scopus and WoS; SJR = 0,33;
- DEDEK, Jan; KOZIOREK, Jiri; ZIDEK, Jan, 2017. WOFEX 2017. In: ed. KRATKY, Michal; DVORSKY, Jiri; MORAVEC, Pavel. VSB - TU Ostrava, kap. Battery Electric Vehicle Range Estimation, s. 120–125. ISBN 978-80-248-4056-7.
- DEDEK, Jan; ZIDEK, Jan, 2019. WOFEX 2019. In: ed. KRATKY, Michal; DVORSKY, Jiri; MORAVEC, Pavel. VSB - TU Ostrava, kap. Battery Electric Vehicle Range Estimation, s. 144–149. ISBN 978-80-248-4333-9.
- DEDEK, Jan; ZIDEK, Jan, 2020. WOFEX 2020. In: ed. KRATKY, Michal; DVORSKY, Jiri; MORAVEC, Pavel. VSB - TU Ostrava, kap. Battery Electric Vehicle Passive Consumption, s. 137–142. ISBN 978-80-248-4422-0. Dostupné z DOI: 10.31490/9788024844220.
- GOLEMBIOVSKY, Matej; DEDEK, Jan; SLANINA, Zdenek, 2017. Low cost balancing unit design. In: *AIP Conference Proceedings*. Author(s). Sv. 1836. Dostupné z DOI: 10.1063/1.4981991. Cited by 8; Indexed by Scopus and WoS; Jrec; SJR = 0,19;
- SLANINA, Z.; DEDEK, J.; GOLEMBIOVSKY, M., 2017. Low cost battery management system. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. Roč. 9, č. 2-5, s. 87–90. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032886354&partnerID=40&md5=a3259534281c5d3efc212bf1cfd19d33>. Cited by 8; Indexed by Scopus; Jrec; Q4; SJR = 0,15;
- SLANINA, Zdenek; DEDEK, Jan; GOLEMBIOVSKY, Matej, 2016. Electric scooter pilot project. In: ROMANIUK, Ryszard S. (ed.). *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*. SPIE. Sv. 10031. Dostupné z DOI: 10.1117/12.2249154. Cited by 3; Indexed by Scopus and WoS; SJR = 0,22;

## Autorovy ostatní publikace

- DEDEK, Jan; GOLEMBIOVSKY, Matej; SLANINA, Zdenek, 2017. Sensoric system for navigation of swarm robotics platform. In: *2017 18th International Carpathian Control Confe-*

rence (ICCC). IEEE, s. 429–433. Dostupné z DOI: 10.1109/carpathiancc.2017.7970438. Cited by 11; Indexed by Scopus and WoS; SJR = 0,16;

GOLEMBIOVSKÝ, Matej; DEDEK, Jan; OZANA, Stepan, 2017. Multicopter control with Navio using REX control system. In: *AIP Conference Proceedings*. Author(s). Sv. 1836. Dostupné z DOI: 10.1063/1.4982002. Cited by 1; Indexed by Scopus and WoS; Jrec; SJR = 0,19;

SLANINA, Zdenek; POKORNY, Rostislav; DEDEK, Jan, 2019. Waste Management - Weighing-Machine Automation. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer International Publishing, s. 747–757. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-030-14907-9\_72. Cited by 2; Indexed by Scopus and WoS; Jrec; Q3; SJR = 0,14;

## Autorovy ostatní výstupy

GOLEMBIOVSKÝ, Matěj; DOČEKAL, Tomáš; DEDEK, Jan; MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukáš; SLANINA, Zdeněk, 2019a. *Funkční vzorek energetického úložiště*.

GOLEMBIOVSKÝ, Matěj; DOČEKAL, Tomáš; DEDEK, Jan; MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukáš; SLANINA, Zdeněk, 2019b. *Poloprovoz energetického úložiště*.

GOLEMBIOVSKÝ, Matěj; KOLAŘÍK, Jakub; DEDEK, Jan; SLANINA, Zdeněk; DOČEKAL, Tomáš, 2020. *Akumulátorový modul pro hot swap připojení*. Užitný vzor [FU], 34502.

SLANINA, Zdeněk; GOLEMBIOVSKÝ, Matěj; KOLAŘÍK, Jakub; DOČEKAL, Tomáš; DEDEK, Jan, 2020. *Systém pro balancované nabíjení akumulátoru*. Užitný vzor [FU], 34325.

## Autorova účast na projektech

DEDEK, Jan; KOZIOREK, Jiri, 2018. *Rozvojeový projekt Rapid prototyping pro průmysl 4.0*. Řešitel.

HÁJOVSKÝ, Radovan, 2018. *FV10706 Výzkum a vývoj inteligentní sítě senzorů pro monitorování bezpečnosti záchytných sítí a bariér pro potřeby geotechniky*. Člen řešitelského týmu.

MIŠÁK, Stanislav, 2020a. *FV40411 Optimalizace procesní inteligence parkovacího systému pro Smart city*. Člen řešitelského týmu.

MIŠÁK, Stanislav, 2020b. *TH04010239 Zvýšení úspor a efektivity parkovacích systémů pro dopravní prostředky*. Člen řešitelského týmu.

SLANINA, Zdenek, 2017. *HS4501707 Vývoj akumulátorových systémů pro stacionární aplikace*. Člen řešitelského týmu.

# Elektronické přílohy

Součástí práce je balík elektronických příloh, který obsahuje následující

- CMRE algoritmus v poslední verzi psán v MATLABu
  - Hlavní soubor
  - Data obsahující:
    - \* Model BEV.
    - \* Pasivní spotřebu.
    - \* Fyzikální konstanty  $g$  a  $r_{earth}$ .
  - Vlastní funkci *rhoAirCalculationNew* pro výpočet  $\rho_{air}$ .
  - Vlastní funkci *ethaCalculation* pro výpočet  $\eta_{TTW}$ .
  - Funkci *plot\_google\_map* pro zobrazení mapy pomocí Google API.<sup>2</sup>
  - Funkci *comma2point\_overwrite* pro záměnu desetinných čárek za tečky.
  - Vlastní i převzatou funkci *lldistkm* pro výpočet vzdáleností na kouli.
  - Funkci *importfile6* pro importování dat trasy.
- Kód programu *Speedgetter* v poslední verzi ke kompilaci.
- Trasy vygenerovaný jednotlivými verzemi programu *Speedgetter*.
  - Trasy z *Speedgetter* Verze 1.0.
  - Trasy z *Speedgetter* Verze 2.0.
  - Trasy z *Speedgetter* Verze 3.0.
  - Trasy z *Speedgetter* Verze 3.1.
- Soubor MS Excel pro vytváření kódu pro program *Speedgetter*.

---

<sup>2</sup>Elektronický klíč – kód pro používání této funkcionality stejně jako klíče pro plné použití programu *Speedgetter* poskytnu na požádání, jeho zveřejnění by mohlo vést k nežádoucím platbám za používání.



## Příloha A

# Externí data

**From:** Jana Gotvaldová <jana.gotvaldova@czso.cz>  
**Sent:** Monday, January 4, 2021 9:58 AM  
**To:** Jan Dedek <jandedek@bvu.cz>  
**Subject:** Re: Průměrný roční nájezd automobilu v ČR

Dobrý den,  
požadované údaje (kolik km najedou řidiči v ČR, průměrný denní/roční nájezd) ČSÚ zcela nesleduje.

Pro Ministerstvo dopravy ČSÚ sledoval průměrný počet km ujetých za rok osobním automobilem a nákladním automobilem, ale pouze v podnicích s 50 a více zaměstnanci vybraných do zjišťování P3-04 (cca 9800 podniků), což mělo na starosti moje oddělení. Poslední zjišťovaný údaj byl s výkazem P3-04 za 1Q 2019, kdy jsme zpracovali výsledky za dopravní přílohu za rok 2018.

Z těchto dat vychází průměry:

- osobním automobilem: 24 531 km/rok
- nákladním automobilem: 44 840 km/rok

*Zbytek zprávy byl vymazán, obsahuje soukromé údaje třetích osob a není relevantní.*

S pozdravem  
Jana Gotvaldová

Obrázek A.1: Množství najetých km flotilových vozů firem v ČR dle českého statistického úřadu.

DRV	DPA	EMISE	km/rok									
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016*	2017*	2018*	2019*
Osobní automobily	Benzín automobilový	PRE ECE	8 774	5 696	3 589	2 979	2 073	2 009	2 044	3 264	3 758	2 487
Osobní automobily	Benzín automobilový	ECE 15/00-01	7 184	7 878	5 504	8 144	2 834	2 891	2 424	1 764	1 843	1 262
Osobní automobily	Benzín automobilový	ECE 15/02	6 665	5 202	4 914	5 967	5 903	3 034	3 692	4 161	4 064	3 973
Osobní automobily	Benzín automobilový	ECE 15/03	8 325	6 180	5 481	5 244	4 110	3 148	2 794	2 456	3 729	2 270
Osobní automobily	Benzín automobilový	ECE 15/04	8 985	7 429	6 174	5 797	5 051	4 676	4 170	3 930	3 911	3 137
Osobní automobily	Benzín automobilový	Konvenční	6 464	5 851	5 644	5 722	5 851	2 871	2 368	2 226	2 278	2 322
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 1	10 414	8 694	8 012	7 842	6 918	6 693	6 092	5 210	5 098	4 887
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 2	11 068	9 731	8 944	8 737	8 162	8 006	7 646	7 084	6 950	6 689
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 3	12 092	10 877	10 204	10 024	9 673	9 354	8 991	8 498	8 127	8 279
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 4	12 745	11 935	11 141	10 644	10 149	9 777	9 311	8 808	8 385	8 127
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 5	12 986	12 970	12 920	13 012	12 612	12 088	11 608	10 857	9 859	9 513
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 6 do roku 2016					5 331	16 502	13 850	12 826	13 358	11 730
Osobní automobily	Benzín automobilový	Euro 6 2017-2019								6 980	15 140	12 345
Osobní automobily	Nafta motorová	Konvenční	12 340	10 934	9 524	9 121	7 832	7 232	6 679	5 614	6 346	5 069
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 1	12 747	11 123	10 031	9 863	8 851	8 610	8 924	9 129	8 521	7 023
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 2	13 979	12 584	11 671	11 219	10 468	10 488	10 000	9 371	9 008	8 406
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 3	16 256	14 900	14 091	13 798	13 096	12 891	12 273	11 693	11 324	11 240
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 4	18 879	17 370	16 028	15 058	14 390	13 861	13 295	12 000	11 157	10 901
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 5	20 205	22 032	21 334	21 900	21 150	20 503	18 686	15 526	14 354	13 384
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 6 do roku 2016					5 232	24 523	21 963	18 782	17 809	16 926
Osobní automobily	Nafta motorová	Euro 6 2017-2019								8 128	19 147	16 928
Osobní automobily	Elektrický pohon	Euro 3	7 656	7 441	8 238	7 173	6 777	6 686	5 864	5 565	5 058	5 160
Osobní automobily	Elektrický pohon	Euro 4	3 513	1 995	3 343	3 833	0	745	784	3 033	6 713	9 578
Osobní automobily	Elektrický pohon	Euro 5	4 742	3 513	2 482	2 705	3 969	3 129	3 225	12 003	11 659	10 715
Osobní automobily	Elektrický pohon	Euro 6 do roku 2016						2 800	4 030	14 723	15 102	16 039
Osobní automobily	Elektrický pohon	Euro 6 2017-2019									14 930	15 315
Osobní automobily	Hybrid	Euro 3	0	0	0	0	18 088	2 064	3 331	16 033	5 456	11 658
Osobní automobily	Hybrid	Euro 4	17 014	24 040	20 157	18 715	16 321	15 024	13 827	15 344	13 728	10 028
Osobní automobily	Hybrid	Euro 5	16 960	18 759	26 714	20 183	18 619	12 633	13 497	16 748	14 819	10 715
Osobní automobily	Hybrid	Euro 6 do roku 2016						9 545	10 338	18 075	16 959	14 928
Osobní automobily	Hybrid	Euro 6 2017-2019									13 223	15 704
Osobní automobily	LPG	Konvenční	10 811	9 915	9 444	10 418	8 033	4 375	4 518	5 042	4 994	3 977
Osobní automobily	LPG	Euro 1	14 402	12 542	11 560	11 995	10 700	5 040	5 081	9 485	9 116	5 721
Osobní automobily	LPG	Euro 2	14 095	13 365	12 903	13 048	12 367	6 323	6 214	10 600	8 027	6 495
Osobní automobily	LPG	Euro 3	15 354	14 630	14 446	14 939	14 553	7 319	7 295	11 125	11 735	8 834
Osobní automobily	LPG	Euro 4	16 349	16 230	15 395	16 453	15 755	7 994	7 626	15 053	12 862	8 735
Osobní automobily	LPG	Euro 5	22 454	20 333	20 509	20 196	20 776	9 405	8 867	12 905	15 331	10 849
Osobní automobily	LPG	Euro 6					1 945	7 976	8 143	19 974	18 130	16 616
Osobní automobily	LPG	Euro 6c								2 623	14 453	13 331
Osobní automobily	CNG	Konvenční	19 232	15 380	14 077	16 591	19 815	12 929	12 866	10 683	10 940	10 691
Osobní automobily	CNG	Euro 3								11 554	11 424	8 940
Osobní automobily	CNG	Euro 4	21 185	21 680	19 688	20 916	20 064	7 447	6 477	14 260	10 556	10 408
Osobní automobily	CNG	Euro 5	28 070	24 938	20 046	21 332	23 929	11 632	10 636	21 735	19 877	17 614
Osobní automobily	CNG	Euro 6						7 247	7 386	23 465	22 668	21 077
Osobní automobily	CNG	Euro 6c									17 744	17 375

\*předběžné údaje

Obrázek A.2: Množství najetých km v ČR dle ministerstva dopravy.

**Tab. 2 Silniční doprava<sup>1)</sup>**

k 31.12.

Rok	Motocykly	Osobní automobily	Mikrobusey a autobusy	Nákladní vozidla	Silniční traktory	Návěsy <sup>2)</sup>	Přívěsy <sup>3)</sup>	Speciální automobily
Years	Motorcycles	Passenger cars	Minibuses, buses and coaches	Lorries	Road tractors	Semi-trailers <sup>2)</sup>	Trailers <sup>3)</sup>	Special vehicles
	1	2	3	4	5	6	7	8
1995	915 229	3 043 316	19 756	202 929	16 382	22 074	630 697	x
1996	918 159	3 192 532	20 489	225 477	17 482	17 685	62 566	92 278
1997	929 627	3 391 541	20 755	246 621	18 751	18 997	72 876	89 937
1998	927 080	3 492 961	19 960	260 276	20 035	20 283	83 645	85 726
1999	799 647	3 439 745	18 981	268 259	21 151	21 483	93 207	85 726
2000	748 140	3 438 870	18 259	275 617	22 669	22 780	104 073	70 838
2001	755 482	3 529 791	18 384	296 412	24 823	24 509	116 185	67 106
2002	760 219	3 647 067	21 340	323 434	26 061	26 809	128 419	85 726
2003	751 634	3 706 012	20 627	340 094	25 652	27 654	140 187	85 726
2004	756 559	3 815 547	19 948	371 437	24 769	28 573	153 828	54 620
2005	794 000	3 958 708	20 134	415 101	24 060	29 087	170 111	51 457
2006	822 703	4 108 610	20 331	468 282	22 622	44 974	189 786	48 716
2007	860 131	4 280 081	20 416	533 916	20 915	50 480	212 429	46 672
2008	892 796	4 423 370	20 375	589 598	17 814	53 623	238 712	43 609
2009	903 346	4 435 052	19 943	587 032	14 735	52 415	258 891	39 300
2010	924 291	4 496 232	19 653	584 921	13 045	55 074	278 137	36 660
2011	944 171	4 581 642	19 674	585 729	11 503	56 184	299 546	34 797
2012 <sup>4)</sup>	976 911	4 706 325	19 882	595 438	8 717	50 129	336 914	33 641
2013	977 197	4 729 185	19 619	593 439	7 626	49 752	345 742	32 447
2014	998 816	4 833 386	19 808	608 711	6 621	52 183	374 050	32 034
2015	1 046 467	5 115 316	19 950	646 792	5 283	53 815	405 908	32 258
2016	1 074 880	5 307 808	20 097	667 705	4 488	53 826	423 373	31 886
2017	1 102 392	5 538 222	20 719	689 368	4 132	52 855	434 872	31 277
2018	1 132 085	5 747 913	21 271	706 262	4 360	50 030	441 769	30 741
2019	1 163 140	5 924 995	21 484	719 687	3 991	46 257	443 216	29 926

<sup>1)</sup> Vozidla registrovaná v ČR / Vehicles registered in the Czech Republic.

<sup>2)</sup> Od roku 1996 byl soubor dat očištěn od osobních návěsů / Since 1996 passenger semi-trailers not included.

<sup>3)</sup> Od roku 1996 byl soubor dat očištěn od osobních přívěsů / Since 1996 passenger trailers not included.

<sup>4)</sup> Údaje k 1.7.2013 - z důvodu přechodu na nový systém evidence vozidel v Centrálním registru vozidel (CRV) v souladu s legislativou EU nejsou údaje k 31.12.2012 k dispozici / As of 1 July 2013 - due to the change of the system in the Central register of vehicles record, information as of 31 January 2012 is not available.

Zdroj / Source: MD

Obrázek A.3: Počet vozidel v ČR dle ministerstva dopravy.

## Příloha B

# Tabulky

Tabulka B.1: Surová data z měření pasivní spotřeby BEV – Měření rezistorem.

Rezistor 1,5 m $\Omega$	$U_R$ (mV)	$U_{Aku}$ (V)	$P$ (W)
Bazální spotřeba + Auto ventilace	9,2	12,38	76
Obrysová světla	9,3	12,37	77
Potkávací světla	22,9	12,12	185
Přední světlomety do mlhy	30,9	12,00	247
Přední a zadní světlomety do mlhy	33,7	11,95	268
Předposlední stupeň ventilace	15,2	12,24	124
Maximální ventilace	18,7	12,17	152
Max ventilace + světlomety	41,8	11,84	330
Bazální spotřeba	5,7	12,42	47
Varovný signál + interiérové osvětlení	6,4	12,42	53
Brzdová světla	8,4	12,38	69
Interiérové osvětlení	6,4	12,42	53
Vyhřívání sedadla řidiče	9,0	12,36	74
Audio systém	7,0	12,40	58
Bazální spotřeba	6,4	12,41	53
Obrysová světla	7,1	12,40	59
Potkávací světla	20,2	12,16	164
+ dálková světla	34,0	11,97	271
+ přední světlomety do mlhy	44,5	11,85	352
+ dálková světla	44,4	11,85	351
Přední stěrače	11,5	12,34	95
+ přední ostřikovač	12,3	12,30	101
Zadní stěrač	8,2	12,38	68
+ zadní ostřikovač	10,6	12,37	87
Průměrná spotřeba výstražných světel	13,6	12,28	111



Tabulka B.3: Surová data z měření pasivní spotřeby BEV – Měření z BMS.

Měření	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$P_{BMS}$ (kW)	$P_{BMS}$ (kW)	$P_{wgp}$ (W)	$P_{wgp}$ (W)
Bez připojeného trakčního aku.	357		0,70		0,25		250	
Trakční aku + dobití palubního aku. + denní svícení	357		1,30		0,50		464	
Bazální spotřeba (B)	357	317	1,00	1,00	0,40	0,30	357	317
B + denní svícení	357	317	1,10	1,10	0,40	0,40	393	349
B + potkávací světla	357	316	1,40	1,50	0,50	0,40	500	474
B + potkávací + dálková světla	356	316	1,90	2,00	0,70	0,60	676	632
B + přední světlomety do mlhy	357	316	1,20	1,30	0,40	0,40	428	411
B + přední + zadní světla do mlhy	357	316	1,40	1,40	0,50	0,45	500	442
B + Brzdová světla	356	316	1,10	1,10	0,40	0,40	392	348
B + Nouzová světla (avg)	356	316	1,20	1,25	0,45	0,40	427	395
B + Směrová světla (avg)	356	316	1,10	1,15	0,40	0,35	392	363
B + Interiérové osvětlení	356	316	1,05	1,05	0,40	0,30	374	332
B + Audio systém max.	356	316	1,05	1,05	0,40	0,30	374	332
B + Čerpadlo chlazení	357	316	1,20	1,30	0,40	0,40	428	411
B + Čerpadlo posilovače brzd	357	316	1,80	1,80	0,70	0,60	643	569
B + "Auto" ventilace	357	316	1,10	1,15	0,40	0,40	393	363
B + Předposlední stupeň ventilace	357	316	1,20	1,30	0,40	0,40	428	411
B + Maximální stupeň ventilace	357	316	1,25	1,40	0,40	0,40	446	442
B + "Boost" stupeň ventilace	357	316	1,50	1,70	0,50	0,40	536	537
B + AC max. + max. ventilace	356		4,20		1,40		1495	0
B + Max. vyhřívání	356		15,00		5,80		5340	0
B + Ustálená hodnota vyhřívání	356		13,70		439,00		4877	0
B + Ofuk čelního skla (HVAC) max.	356		15,00		5,30		5340	0
B + Ofuk čelního skla (HVAC) avg.	356		13,30		4,70		4735	0
B + Přední stěrač min	355	316	1,15	1,15	0,40	0,35	408	363
B + Přední stěrač max.	356	316	1,25	1,20	0,40	0,40	445	379
B + Přední stěrač auto + ostriřkovač	356	316	1,15	1,35	0,40	0,40	409	427
B + Zadní stěrač	356	316	1,05	1,05	0,40	0,30	374	332
B + Zadní stěrač + ostriřkovač	356	316	1,15	1,20	0,40	0,40	409	379
B + Vyhřívání zadního skla	356	316	1,50	1,60	0,50	0,50	534	506
B + Vyhřívání sedadla řidiče	356	316	1,10	1,10	0,40	0,35	392	348
B + Zpětná + brzdová světla	356	316	1,30	1,40	0,50	0,40	463	442
B + Drive + brzda	356	316	1,15	1,20	0,40	1,20	409	379
B + Neutral + brzda	356	316	1,10	1,10	0,40	1,10	392	348
B + Dobíjení palubního aku.	356	316	1,10	1,10	0,40	0,40	392	348

Tabulka B.4: Výsledky měření přenosu energie z akumulátoru na kola.

Rychlost ( <i>km/h</i> )	Výkon na válcích ( <i>kW</i> )	Výkon z aku. ( <i>kW</i> )	Účinnost (%)
30	4,6	6,6	70
30	9,4	12,2	77
30	32,1	41,0	78
30	13,8	17,1	81
30	24,6	30,4	81
30	16,4	20,2	81
30	20,8	25,5	82
50	10,4	14,2	73
50	15,9	20,5	78
50	27,4	34,5	79
50	20,9	25,8	81
50	47,0	55,9	84
50	36,0	42,4	85
75	6,0	11,4	53
75	16,1	22,9	70
75	24,7	31,2	79
75	31,2	38,8	80
75	44,9	53,5	84
75	40,3	48,0	84
100	17,9	26,0	69
100	27,7	36,6	76
100	36,3	46,3	78
100	42,1	52,6	80
125	14,6	25,2	58
125	19,0	29,9	64
125	24,9	36,5	68

Tabulka B.5: Data pro trasu vygenerována programem Speedgetter.

Node	Latitude	Longitude	Elevation	Name	Speed_kmph	Speed_mps	Max_speed	Ref	Highway	Surface
2,51E+08	49,83056	18,16054	263,1794		40	11,1			service	
7,04E+09	49,83048	18,16049	263,0053		40	11,1			service	
2,51E+08	49,83043	18,16069	262,553	Dr, Slabihoudka	40	11,1	50		residential	asphalt
6,53E+08	49,83012	18,16189	258,7454	Dr, Slabihoudka	40,3	11,2	50		residential	asphalt
4,32E+08	49,82983	18,16302	253,9493	Dr, Slabihoudka	40,3	11,2	50		residential	asphalt
2,26E+09	49,82978	18,16311	253,646	Dr, Slabihoudka	40,3	11,2	50		residential	asphalt
2,26E+09	49,82971	18,16318	253,5222	Dr, Slabihoudka	40,7	11,3	50		residential	asphalt
2,26E+09	49,82964	18,16324	253,6629	Dr, Slabihoudka	40	11,1	50		residential	asphalt
2,26E+09	49,82956	18,16327	253,8317		40,3	11,2			footway	
2,26E+09	49,82922	18,16307	253,4555	17, listopadu	39,6	11	50		secondary	
2,26E+09	49,82902	18,16295	253,7154		59,8	16,6			service	
2,26E+09	49,82867	18,16275	253,1506	17, listopadu	38,9	10,8	50		secondary	
2,26E+09	49,82866	18,16274	253,1032		40,3	11,2			footway	
2,26E+09	49,82852	18,16267	252,5551		40	11,1			service	
2,26E+09	49,82821	18,16248	252,4542	17, listopadu	39,2	10,9	50		secondary	
2,26E+09	49,82762	18,16212	251,0811	17, listopadu	42,8	11,9	50		secondary	
2,26E+09	49,82734	18,16196	250,6543		39,6	11			service	
2,26E+09	49,8273	18,16193	250,5713	17, listopadu	39,6	11	50		secondary	
2,26E+09	49,82715	18,16181	250,2759		40	11,1	50		residential	
2,26E+09	49,8271	18,16177	250,1199		38,5	10,7			footway	
2,26E+09	49,82661	18,16146	246,7128		40,3	11,2			footway	
2,26E+09	49,82652	18,16144	246,0325		30,2	8,4	50		residential	
2,95E+09	49,82611	18,16118	243,8362	17, listopadu	40,3	11,2	50		residential	
2,26E+09	49,82609	18,16117	243,7346	K Myslivně	40	11,1	50		residential	
2,26E+09	49,82592	18,16105	242,9564	17, listopadu	41	11,4	50		secondary	
2,95E+09	49,82582	18,16099	242,5429	17, listopadu	40,3	11,2	50		secondary	
2,95E+09	49,82562	18,16087	241,3514	K Myslivně	38,9	10,8	50		residential	
2,26E+09	49,82543	18,16076	239,8602	17, listopadu	39,6	11	50		secondary	



Tabulka B.6: Tabulka určení pasivní spotřeby pro jednotlivé scénáře.

Výkon dle spotřebiču	P (W)	Min.	Komf.	Déšť	Mlha	Noc	Dešť, mlha	Dešť, noc	Mlha, noc	Horko	Zima	Sněžení	Hust. sn.
Bazální spotřeba	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0
Denní svícení	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7
Potkávací světla	149,9					134,9	134,9	134,9				134,9	134,9
Dálkové+potkávací sv.	317,2					31,7	31,7						
Přední mlhovky	82,6				82,6		82,6		82,6				82,6
Zadní mlhovky	51,5				51,5		51,5		51,5				51,5
Směrová světla	40,5	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Zpětná světla	83,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Brzdová/obrysová sv.	32,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Osvětlení SPZ	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Interiérové osvětlení	15,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Posilovač brzd	268,7	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Čerpadlo chlazení	82,6	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
Vzd. Auto (první)	41,1		41,1			41,1		8,2			41,1		
Vzd. předposlední	82,6			68,8	68,8		68,8	68,8	68,8	82,6			82,6
Vzd. Boost	199,4			33,2	33,2		33,2		33,2				
AC max	959,7									479,9			
Topení max	4804,5										400,4	400,4	400,4
Topení avg	4341,7										3979,9	3979,9	3979,9
Ofuk čelního skla avg	4377,8			364,8	364,8		364,8	364,8	364,8				
Přední stěrač pomalý	48,8			48,8	48,8		48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8
Přední stěrač rychlý	75,1						75,1						75,1
Zadní stěrač	15,8			15,8	15,8		15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
Vyhřívání zadního skla	182,8			182,8	182,8		182,8	182,8	182,8	182,8	182,8	182,8	182,8
Vyhřívání sedačky	32,6										32,6	32,6	32,6
Dobájení 12V baterie	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6	32,6
CD + audio na max	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
<b>Celkem</b>		435	492	1165	1299	658	1325	1306	1434	1196	5087	5329	5489

Tabulka B.7: Přehled vstupních proměnných původního algoritmu.

Číslo proměnné	Vstupní proměnné
1	Hmotnost posádky a nákladu
2	Maximální kapacita akumulátoru
3	Stav nabití akumulátoru (SoC)
4	Minimální povolený stav nabití
5	Zvolená trasa
6	<i>Souřadnice každého bodu trasy</i>
7	<i>Nadmořská výška každého bodu</i>
8	<i>Průměrná rychlost mezi dvěma body</i>
9	<i>Maximální rychlost mezi dvěma body</i>
10	<i>Jméno ulice mezi dvěma body</i>
11	<i>Číslo pozemní komunikace mezi dvěma body</i>
12	<i>Typ pozemní komunikace v každém bodě</i>
13	<i>Povrch pozemní komunikace v každém bodě</i>
14	<i>Čas východu slunce na daných souřadnicích</i>
15	<i>Čas západu slunce na daných souřadnicích</i>
16	<i>Teplota vzduchu se změnou co 10 km</i>
17	<i>Pocitová teplota co 10 km</i>
18	<i>Atmosférický tlak co 10 km</i>
19	<i>Vlhkost vzduchu co 10 km</i>
20	<i>Rosný bod co 10 km</i>
21	<i>Rychlost větru co 10 km</i>
22	<i>Směr větru co 10 km</i>
23	<i>Úhrn dešťových srážek co 10 km</i>
24	<i>Úhrn sněhových srážek co 10 km</i>
25	Příkon pasivních spotřebičů
26	Poloměr Země
27	Tíhové zrychlení
28	Univerzální plynová konstanta
29	Molární hmotnost suchého vzduchu
30	Molární hmotnost vodních par
31	Hmotnost vozidla
32	Koeficient aerodynamického odporu vozidla
33	Čelní plocha vozidla
34	Koeficient smykového tření vozidla
35	Maximální rychlost vozidla
36	Maximální akcelerace vozidla
37	Minimální akcelerace
38	Maximální decelerace
39	Maximální výkon vozidla
40	Maximální rekuperace vozidla
41	TTW účinnost vozidla
42	Počet článků v akumulátoru
43	Nominální napětí článku
44	Kapacita nového článku

Tabulka B.8: Přehled vnitřních proměnných původního algoritmu.

Číslo proměnné	Vnitřní proměnné
1	teplota v K
2	relativní atmosferický tlak
3	specifická plynová konstanta
4	hustota suchého vzduchu
5	Tlak vodních par nad vodou/ledem
6	Tlak vodních par
7	hustota vlhkého vzduchu
8	hustota vzduchu
9	ujetá vzdálenost
10	Spotřebovaná energie
11	Stav zdraví akumulátoru (SoH)
12	Napětí akumulátoru
13	Maximální uložená energie v akumulátoru
14	Aktuálně uložená energie v akumulátoru
15	Maximální vyčerpateľná energie z akumulátoru
16	Účinnost rekuperace
17	Cíl trasy je v dosahu?
18	Cíl je nedosažitelný?
19	Byla nasazena optimalizace?
20	Hill hazard?
21	Počet cyklů optimalizace
22	Poslední známá energie v aku
23	Délka každého úseku dle Pythagora
24	Délka každého úseku dle Haversine
25	Změna převýšení
26	Úhel převýšení
27	Fs pro každý segment
28	Fr pro každý segment
29	Čas pohybu pro každý segment v s ujetý maximální rychlostí
30	Čas pohybu pro každý segment v h ujetý maximální rychlostí
31	Příspěvek pasivní spotřeby pro každý segment ujetý maximální rychlostí
32	Změna rychlosti na každém segmentu ujetý maximální rychlostí
33	Fi pro každý segment ujetý maximální rychlostí
34	Fa pro každý segment ujetý maximální rychlostí
35	Pi pro každý segment ujetý maximální rychlostí
36	Ps pro každý segment ujetý maximální rychlostí
37	Pr pro každý segment ujetý maximální rychlostí
38	PA pro každý segment ujetý maximální rychlostí
39	P pro každý segment ujetý maximální rychlostí
40	spotřebovaná energie v aku pro každý segment ujetý maximální rychlostí
41	zbývající energie v aku pro každý segment ujetý maximální rychlostí
42	Čas pohybu pro každý segment v s ujetý průměrnou rychlostí
43	Čas pohybu pro každý segment v h ujetý průměrnou rychlostí
44	Příspěvek pasivní spotřeby pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
45	Změna rychlosti na každém segmentu ujetý průměrnou rychlostí
46	Fi pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
47	Fa pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
48	Pi pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
49	Ps pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
50	Pr pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
51	PA pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
52	P pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
53	Spotřebovaná energie v aku pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí
54	Zbývající energie v aku pro každý segment ujetý průměrnou rychlostí

Tabulka B.9: Přehled výstupních proměnných původního algoritmu.

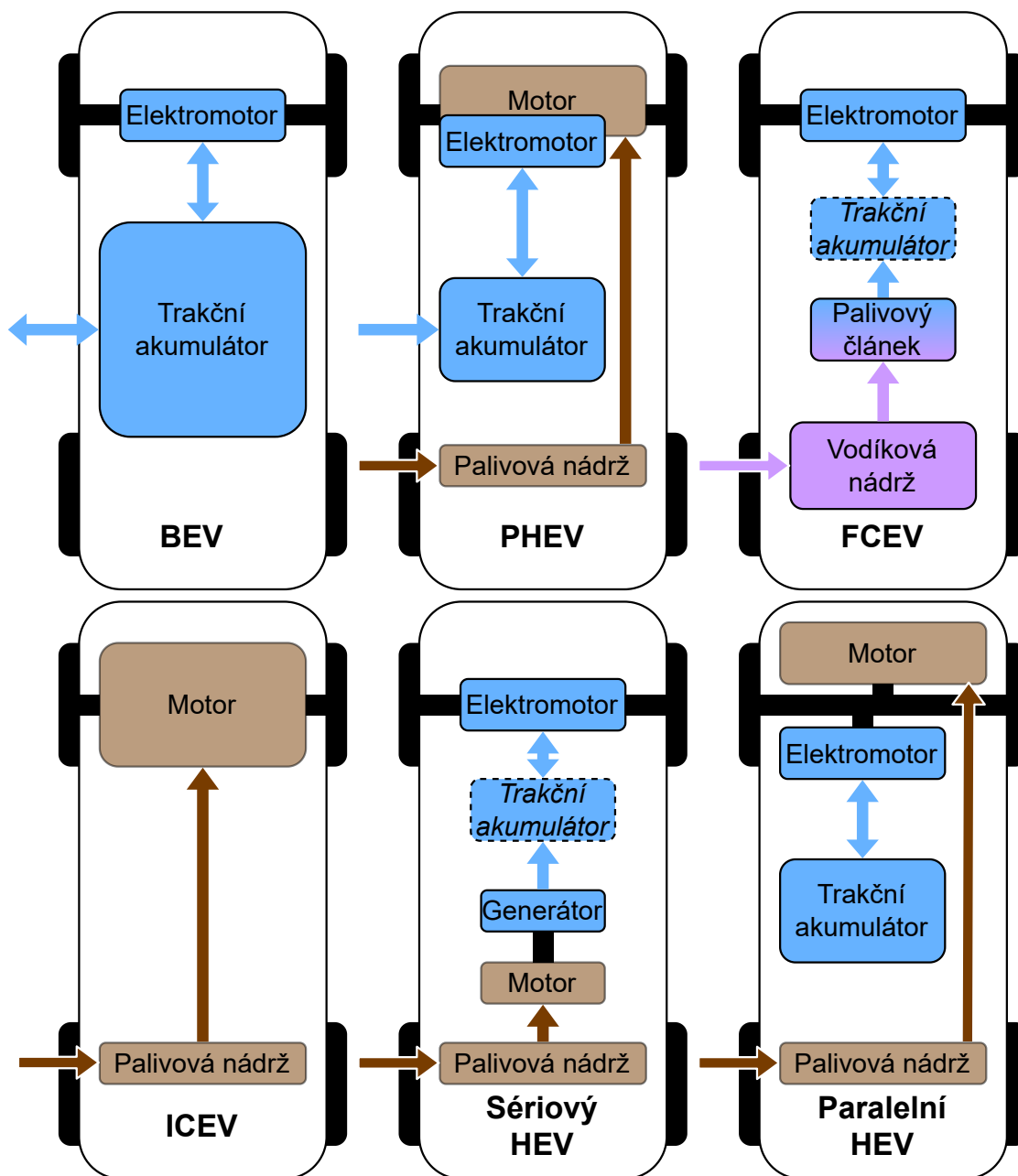
Číslo proměnné	Výstupní proměnné
1	Celková spotřebovaná energie pro trasu ujetou průměrnou rychlostí
2	Celková pasivní spotřeba pro trasu ujetou průměrnou rychlostí
3	Celkový čas na trase ujeté průměrnou rychlostí
4	Průměrná rychlost na trase ujeté průměrnou rychlostí
5	Celková spotřebovaná energie pro trasu ujetou maximální rychlostí
6	Celková pasivní spotřeba pro trasu ujetou maximální rychlostí
7	Celkový čas na trase ujeté maximální rychlostí
8	Průměrná rychlost na trase ujeté maximální rychlostí
9	Celková délka trasy dle Pythagorovy metody
10	Celková délka trasy dle Haversinovy metody
11	Rozdíl v délce trasy vypočtené Pythagorovou a Haversinovou metodou
12	Počet segmentů trasy
13	Délka nejdelšího segmentu trasy
14	Počítadlo invalidních dat maximální rychlost
15	Počítadlo invalidních dat průměrné rychlost
16	Nejvyšší nadmořská výška na trase
17	Nejnižší nadmořská výška na trase
18	Největší úhel stoupání na trase
19	Nejnižší úhel stoupání na trase
20	Průměrný úhel stoupání na trase
21	Podíl pasivní spotřeby na celkové spotřebě na trase ujeté maximální rychlostí
22	Podíl pasivní spotřeby na celkové spotřebě na trase ujeté průměrnou rychlostí
23	Odhad zbývající energie uložené v akumulátoru po trase ujeté průměrnou rychlostí
24	Odhad zbývající energie uložené v akumulátoru po trase ujeté maximální rychlostí
25	SoC v destinaci po trase ujeté maximální rychlostí
26	SoC v destinaci po trase ujeté průměrnou rychlostí
27	Čas zpracování algoritmu
28	Mapa se zaznačenou trasou
29	Graf rychlosti na trase včetně doporučené rychlosti v případě omezení
30	V případě nasazení omezení varování a chybové reporty pro uživatele

## Příloha C

# Obrázky a grafy

Popis obrázku C.1 a použitého názvosloví v práci:

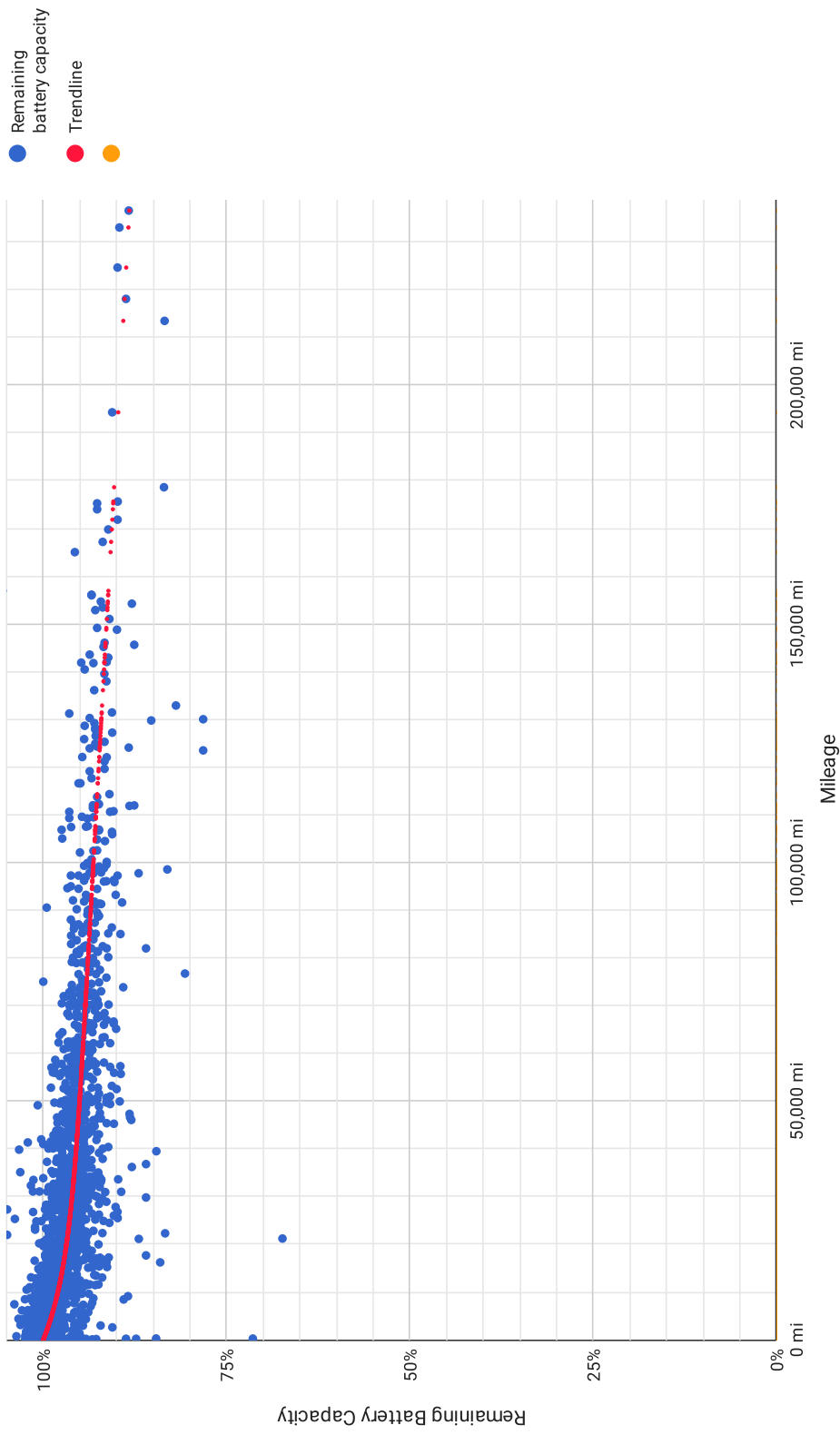
- EV – Elektrické vozidlo, zahrnuje všechna vozidla, ve kterých se používá elektrická energie k pohonu vozu. Jde tak nazvat trolejbusy, tramvaje, vlaky, bateriové elektromobily i elektrokoloběžky.
- BEV – Bateriové elektrické vozidlo, pro svůj primární pohon používá elektromotor a jako zdroj energie používá sekundární elektrochemické články spojené v trakčním akumulátoru. Může jím být elektrokoloběžka, elektromotorka, ale nejčastěji se používá ve spojení s osobními auty jako bateriový elektromobil.
- PHEV – Plugin hybridní elektrické vozidlo, pro svůj pohon používá jak elektromotor, tak motor na fosilní paliva v různých konfiguracích. Zásadní odlišností od ostatních hybridních vozů je možnost nabíjet trakční akumulátor ze sítě. Ve většině případů se dobíjí pouze AC proudem a disponují palubní nabíječkou. Výjimečně se používá zkratka PEV.
- Souhrnně se BEV + PHEV nazývají jako „vozidla / auta do zásuvky“, a to kvůli jejich schopnosti nabít se ze sítě.
- HEV – Hybridní elektrické vozidlo, je nejširším možným okruhem. Hybridním pohonem se dle nepsaných pravidel nazývá vše, co používá k pohonu více než jeden druh energie. Spadají tam tedy diesel-elektrické lokomotivy, Porsheho hybridní kočár, i stíhač tanků z druhé světové války, ale dle definice i vodíková vozidla. HEV se dále dělí nejčastěji dle uspořádání.
- Sériový HEV – je většinou poháněn elektromotorem, který získává energii z generátoru, často doplněného o baterii el-chem. článků nebo superkapacitorů.
- Paralelní HEV – má více pohonů připojených na pohonnou soustavu a může je kombinovat dle potřeby.
- FCEV – z anglického fuel cell electric vehicle, volně přeloženo jako elektromobil s palivovým článkem, je speciální případ sériového hybridu. Jedinou pohonnou jednotkou je elektromotor, který získává energii pro provoz z baterie el-chem článků nebo superkapacitorů nebo je přímo napojen na palivový článek, který syntetizuje vodík a vyrábí z něj elektrickou energii. Příkladem takového vozidla je Toyota Mirai.
- Další kombinací mohou být sérioparalelní HEV nebo rozdělení dle „hybridizace pohonu“ na micro, mild a full hybrid.



Obrázek C.1: Typy elektromobilů. Bloky ohraničené čarkovaně nejsou součástí všech vozidel.

- Celá terminologie není konzistentní. Například BMW v některých starších modelech BEV i3 umožňovalo využívat vestavěný malý benzínový motor k nouzovému dojetí vozidla k dobíječce. Tím vznikl rozpor, protože by se nejednalo o BEV, ale o sériový PHEV.
- ICEV – Z anglického internal combustion engine vehicle, tedy přeneseně spalovací motor. Zde se řadí vozidla jak se zážehovým, tak se vznětovým pohonem bez ohledu na palivo (Benzín, nafta, LPG, etanol, CNG).

Tesla Model S/X/3 Mileage vs Remaining Battery Capacity (Same chart as above but at full scale for better perspective)



Obrázek C.2: Záznamy komunity uživatelů vozidel Tesla o SoH jejich trakčních akumulátorů. Převezato z (Tesla Battery Survey, 2021).