

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

Analýza provozních parametrů elektrovozidel v reálném provozu

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Autor práce: Bc. Michal Sedláček

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Sedláček

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Analýza provozních parametrů elektrovozidel v reálném provozu

Název anglicky

Analysis of the electric vehicle operating parameters

Cíle práce

Cílem práce bude vytvořit ucelený přehled vozidel využívající elektrickou energii jako zdroj energie pro pohon vozidla. Dále provést analýzu jejich provozních parametrů v reálném provozu.

Metodika

Rešerše řešené problematiky na základě studia a analýzy odborných informačních zdrojů. Vlastní experimenty s různými elektrovozidly v reálném provozu a analýza jejich provozních parametrů.

Práce bude strukturovaná dle následující osnovy:

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Přehled řešené problematiky
4. Praktická část práce
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů
7. Přílohy

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

elektromobilita, elektromobil, dojezd, dobíjení

Doporučené zdroje informací

- FRIVALDSKÝ, Michal, Michal PRAŽENICA, Roman KOŇARIK, Pavol ŠPÁNIK, Peter ČUBOŇ, Roman RADVAN a Vladimír RÁČEK. Elektromobilita. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, EDIS-vydavateľské centrum ŽU, 2019. ISBN 9788055415987
- GRÖGER, Oliver, Hubert A. GASTEIGER a Jens-Peter SUCHSLAND. Review—Electromobility: Batteries or Fuel Cells? Journal of The Electrochemical Society [online]. 2015, 162(14), doi:10.1149/2.0211514jes
- Hromádka, J.: Speciální spalovací motory a alternativní pohony, Nakladatelství Grada, Praha, 2012, ISBN 978-80-247-4455-1
- STODOLA, Jiri, Alena BREZNICKA a Petr STODOLA. The Influence of Electromobility on the Czech Automotive Industry. In: 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT) [online]. IEEE, 2019, ISBN 978-1-7281-4593-8. Dostupné z: doi:10.1109/MILTECHS.2019.8870106
-

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2021

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 20. 10. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "**Analýza provozních parametrů elektrovozidel v reálném provozu**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Martinovi Kotkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a cenné připomínky.

Analýza provozních parametrů elektrovozidel v reálném provozu

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá aktuální problematikou elektromobility. V teoretické části po krátké historii elektrovozidel je charakterizován elektromobil po technické stránce a princip jeho pohonu. Dále jsou popsány používané akumulátory, faktory ovlivňující nabíjení a dojezd automobilu.

Praktická část prezentuje a analyzuje výsledky provozních parametrů získané dvěma vozidly v reálných podmínkách s cílem zjistit jejich spotřebu energie. V závěru je vypracována tabulka s přehledem vozidel s elektrickým pohonem a pomocí statistických metod vyhodnoceno, jak se jednotlivé provozní parametry vzájemně ovlivňují.

Klíčová slova: elektromobilita, elektromobil, dojezd, dobíjení

Analysis of the vehicle operating parameters

Abstract:

The diploma thesis deals with current issues of electromobility. In the theoretical part, after a brief history of electric vehicles (EV), the electric car is characterized from a technical point of view and the principle of its drivetrain is also described. The use of batteries, factors influencing the charging and range of the EV is mentioned too.

The practical part presents and analyses the results of operating parameters obtained by two vehicles in real conditions in order to determine their energy consumption. In the end, a table with an overview of electric vehicles is prepared and statistical methods are used to evaluate how the individual operating parameters interact each other.

Keywords: electromobility, electric vehicle, range, charging

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk | 1 |
| 1 Úvod | 2 |
| 2 Cíl práce | 3 |
| 3 Metodika práce | 3 |
| 4 Přehled řešené problematiky | 4 |
| 4.1 Historie elektromobilů | 4 |
| 4.1.1 Vzestup a pád..... | 5 |
| 4.1.2 Znovuobjevení EV | 6 |
| 4.2 Technologie elektrovozidla..... | 8 |
| 4.2.1 Elektromotor | 8 |
| 4.2.2 Palubní nabíječka (On Board Charger – OBC) | 12 |
| 4.2.3 Elektronický řídicí systém (Electronic Control Unit – ECU)..... | 14 |
| 4.3 Provozní vlastnosti elektropohonu | 14 |
| 4.3.1 Rekuperace..... | 15 |
| 4.4 Varianty elektrických vozidel | 16 |
| 4.4.1 Bateriové elektrické vozidlo | 16 |
| 4.4.2 Hybridní vozidla (HEV) | 16 |
| 4.4.3 Plug in Hybrid (PHEV)..... | 20 |
| 4.4.4 Elektrické vozidlo s palivovými články - FCEV | 20 |
| 4.5 Baterie | 20 |
| 4.5.1 Charakteristiky akumulátoru..... | 21 |
| 4.5.2 Systém správy baterie (Battery Management System) | 25 |
| 4.6 Nabíjení | 26 |
| 4.6.1 Průběh nabíjení | 27 |
| 4.6.2 Nabíjecí režimy | 28 |
| 4.7 Vliv na životní prostředí..... | 29 |
| 5 Praktická část práce | 31 |
| 5.1 Testované elektromobily | 31 |
| 5.1.1 Škoda Citigo iV | 32 |
| 5.2 Trasa pro měření | 33 |
| 5.3 Diagnostické nástroje | 35 |
| 5.4 Měření parametrů při nabíjení..... | 36 |
| 5.4.1 Nabíjení Škoda Enyaq iV 80. | 37 |
| 5.4.2 Nabíjení Škoda Citigo iV..... | 38 |
| 5.4.3 Vyhodnocení nabíjení | 39 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.5 | Měření parametrů během jízdy | 39 |
| 5.6 | Obecná analýza provozních parametrů elektromobilů..... | 42 |
| 6 | Závěr..... | 48 |
| 7 | Seznam použitých zdrojů | 50 |
| 8 | Seznam obrázku | 63 |
| 9 | Seznam tabulek | 63 |
| 10 | Seznam grafů | 64 |
| 11 | Přílohy | 65 |
| 11.1 | Příloha 1 Pole účinnosti spalovacího motoru..... | 65 |
| 11.2 | Příloha 2 Pole účinnosti elektromotoru..... | 65 |
| 11.3 | Příloha 3 | 66 |

Seznam použitých zkratk

| | |
|-----------------|--|
| EV | Electric Vehicle (Elektrické vozidlo) |
| CO ₂ | Oxid uhličitý |
| CO | Oxid uhelnatý |
| NO _x | Oxidy dusíku |
| SO ₂ | Oxid siřičitý |
| HC | Uhlovodíky |
| CH ₄ | Methan |
| EU | Evropská unie |
| USA | Spojené státy americké |
| DC | Direct Current (Stejnoseměrný proud) |
| AC | Alternating Current (Střídavý proud) |
| BMS | Battery Management System (Systém správy baterie) |
| GPS | Global Positioning System (Globální polohový systém) |
| MS | Microsoft |

1 Úvod

Výroba automobilů se stala důležitou součástí celosvětového průmyslu nejen na ekonomické úrovni, ale také na poli vývoje a výzkumu. Neustále se vyvíjejí technologické prvky, které se zavádějí do vozidel pro zvýšení bezpečnosti cestujících i chodců. Tyto příslušenství umožňují se pohodlně a bezpečně přepravovat z bodu A do bodu B. Výše zmíněné faktory se podílejí na zvyšujícím se počtu vozidel na silničních komunikacích. To však vedlo a stále vede k dramatickému zvýšení škodlivých emisí (CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , HC , pevné částice), které vznikají jako produkt spalovacího procesu. [1, 2]

Podle evropské unie je dopravní sektor (osobní a nákladní vozidla) zodpovědný za 22 % celkových emisí CO_2 . Z této hodnoty je 72 % emisí CO_2 způsobeno vozidly. [1] Oxid uhličitý navíc spolu s NO_x a CH_4 patří mezi tzv. skleníkové plyny, které se podílejí na globálním oteplování. [2] Samotné spalovací motory obtížně plní emisní limity (95 g CO_2/km pro rok 2020), které se Evropská Unie dle nařízení (EU) 2019/631 zavázala plnit v souvislosti s Pařížskou klimatickou dohodou. Navíc se tyto limity budou stále zpřísnovat s cílem EU stát se klimaticky neutrální do roku 2050. Jednou z možností, jak k tomu přispět je za pomoci elektrovozidel, které neprodukují CO_2 , NO_x během svého provozu. Lze je tak označit jako bezemisní (0 g CO_2/km) – nabíjení se dle legislativy nezapočítává. Energeticky náročná výroba baterií však značně zatěžuje životní prostředí. [3]

Elektrická vozidla (EV) představují mnoho výhod na rozdíl od konvenčních pohonů. Udává se, že celková účinnost od získání energie až po její přenos na kola dosahuje k 72 % při výrobě elektřiny z obnovitelných zdrojů. Účinnost od těžby ropy až po získání energie z paliva u diesellového motoru dosahuje až 37 %. [4]

EV jsou také technologicky jednodušší. Neobsahují převodovku, spojku, palivovou pumpu, komponenty pro ztišení hluku motoru atd. Díky zjednodušení a obsahu méně komponentů mají vyšší spolehlivost a mnohem menší náklady na údržbu než běžné motory. Jednoduše je zde méně věcí, které se mohou rozbít. Jízda s nimi je také komfortnější díky absenci vibrací a hluku od motoru. To však může představovat určitou hrozbu pro ostatní účastníky provozu (chodci), kteří přeslechnou blížící se automobil. [5]

Elektromotory umožňují využít vyšší točivý moment v širokém rozsahu rychlosti, což představuje vyšší výkon a zrychlení. Také využívají rekuperační energii během brzdění. [5]

Častý názor lidí proti pořízení elektromobilu je jejich nízký dojezd, dlouhá doba nabíjení a vyšší pořizovací cena. Tyto vlastnosti se však neustále zlepšují.

2 Cíl práce

Cílem teoretické části je vytvořit ucelený přehled vozidel využívající elektrickou energii jako hlavní nebo vedlejší zdroj energie. Popsat technologii elektrovozidel (EV), výhody a nevýhody oproti konvenčním automobilům a také představit problematiku nabíjení.

Hlavním cílem praktické části je provedení experimentu v reálném provozu a následně analyzovat získané provozní parametry. V závěru dojde k vytvoření uceleného přehledu elektromobilů a analýzy jejich provozních parametrů.

3 Metodika práce

K vypracování teoretické části diplomové práce budou využity odporné z databází (Researchgate, ScienceDirect, atd.), ale také knihy zabývající se touto problematikou.

K analýze provozních parametrů v praktické části budou využity vozidla Škoda Citigo iV a Škoda Enyaq. Měřicí okruh se skládá z městských částí (rychlost do 50 km/h), mimoměstských částí (rychlost do 90 km/h) a dálniční části (rychlost do 130 km/h). Provozní data z tohoto okruhu budou získána pomocí diagnostických přístrojů VAG-COM a TEXA. Dalším využitým měřicím nástrojem bude GPS Garmin, který zaznamenává aktuální polohu vozidla a jeho rychlost. Získaná data budou v programu MS Excel analyzována s vyvozením závěru.

4 Přehled řešené problematiky

Pojem elektromobilita představuje pohyb dopravních prostředků s využitím elektřiny. Její nedílnou součástí je dobíjecí infrastruktura sloužící k nabíjení trakční baterie¹. Elektromobil je motorové vozidlo s elektrickým pohonem. Elektrickou energii využívá z vlastního akumulátoru. [6]

Elektrovozidla bývají často kritizována za krátký dojezd, vysokou cenu, nedostatečné možnosti dobíjení, ale i tvrzení, že provoz elektromobilů není ekologičtější, než provoz běžných spalovacích automobilů. To se již však mění. Začínají se více vyrábět vozidla, která byla vyvinuta jako čistá elektroauta a nevznikla tak konverzí klasického automobilu např. z Škoda Citigo na elektrickou Škoda Citigo IV. Jejich dříve běžný dojezd okolo 200–250 km se dnes může pohybovat okolo 500 km při volbě největšího akumulátoru a rychlost nabíjení se také zrychluje při použití rychlonabíjecích stanic. [7] Odpovědi na tyto kritické otázky budou zodpovězeny v následujících kapitolách.

4.1 Historie elektromobilů

Elektromobily jsou často považovány jako moderní technologie, ve skutečnosti jsou kolem nás již více než 100 let. Kdo vynalezl první EV není úplně jasné a vynález je tak přisuzován v různých zdrojích pokaždé jiným osobnostem [8].

Roku 1769 vynalezl Francouz Nicholas Cugnot model automobilu, který byl poháněn parním motorem. O rok později postavil plnohodnotný vůz schopný dosahovat rychlosti 3,62 km/h. [8]

V roce 1800 představil Alessandro Volta první baterii. O 21 let později (1821) přišel Michael Faraday s vynálezem primitivního elektromotoru. Mezi roky 1832–1839 Robert Anderson uvedl elektrický kočár. Jeho baterie nebyly nabíjecí, ty byly vynalezeny později - 1859. Až v roce 1886 vynalezl Karl Benz benzínovou tříkolku. [8, 9]

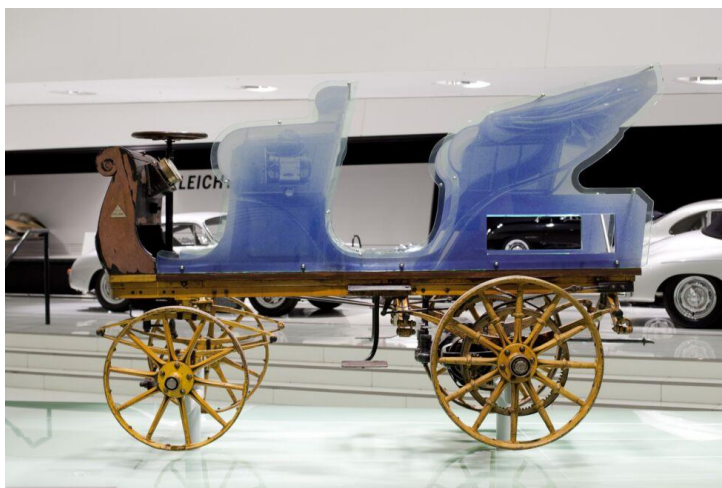
¹ Baterie – článek, který je na jedno použití. Po vybití se již nedá nabít. Lze hovořit také o primární baterii. V literaturách týkající se elektromobility se však běžně používá pojem baterie pro opakované nabíjení.

Akumulátor – článek, který lze opakovaně dobíjet. Nazývá se také sekundární baterie. [12]

4.1.1 Vzestup a pád

Rozvoj toho elektropohonu přišel až okolo roku 1890. Do této doby se jednalo spíše o prototypy. Rozvoj elektrovozidel byl především doménou USA, v Evropě však Ferdinand Porsche představil svoje elektrovozidlo Egger – Lohner C.2 Phaeton (1898) s maximální rychlostí 34 km/h, dojezdem 80 km a výkonem až 3,7 kW. Hmotnost olověných baterií byla 500 kg. Celková hmotnost vozidla dosahovala 1359 kg. Na obrázku 1 je zachycen vůz v muzeu ve Stuttgartu. Důležitý byl také vynález regenerativního brzdění (1897), při kterém vozidlo využívá kinetickou energii během brzdění a nabíjí tím akumulátor, což zvyšuje dojezd. Tato technologie se podílí významně na zvýšení energetické účinnosti. [10, 11]

Obrázek 1 Egger – Lohner C.2 v muzeu ve Stuttgartu



Zdroj:[10]

V roce 1900 bylo ve Spojených státech amerických zaregistrováno 4000 automobilů (40 % parní pohon, 38 % elektrovozidel a 22 % vozidel poháněných jiným, nejčastěji benzínovým motorem). Vrcholem se stal rok 1912 kdy bylo prodáno 33 842 elektromobilů v USA. [12] Elektromobily byly populární, protože je nebylo nutné ručně za pomoci kliky startovat. Rovněž neobsahovali složitý řadičský systém pro změnu rychlosti, který měli spalovací automobily. Vozidla si získala popularitu zejména u žen, které neměly rády hluk a zápach vznikající při spalování benzínu. [13]

Postupný konec éry tohoto pohonu přinesl Henry Ford, který představil benzínový Model T (1908), který stál v této době \$850 (18měsíčních platů a dnešních 593 000 Kč), kdežto vůz na elektrický pohon stál více než dvakrát tolik. V roce 1912 se navíc vynalezl elektrický startér a odpadlo tak ruční startování. O rok později byla představena panem Fordem pásová výroba, která zkrátila výrobní čas z 12 h na 1 h a 30 min a zlevnila výrobu.

Výrobní takt byl 3 minuty. To umožnilo snížit pořizovací cenu až pod \$300 v roce 1923. [9, 12, 14] Příkladem vysoké ceny může být vůz Detroit Electric Model 47 Brougham (1914) nabízený za cenu \$3730 (dnešních 2 373 000 Kč) – obrázek 2.

Jeho dojezd však na tehdejší dobu činil úctyhodných 130 km s maximální rychlostí 32 km/h. Hmotnost baterií byla 530 kg a ostatních částí 1118 kg [14, 15]. Pro informaci vůz BMW I3 nabízený v roce 2013 nabízel dojezd 130 – 160 km. [16]

Obrázek 2 Detroit electric



Zdroj: [15]

Útlum ve výzkumu a výrobě elektromobilů nastal až do devadesátých let dvacátého století. [9]

4.1.2 Znovuobjevení EV

Již v roce 1990 vzhledem ke zvyšujícímu se znečištění ovzduší požadovala Kalifornie, aby 7 největších výrobců do roku 1998 vyrábělo 2 % elektromobilů. Od toho bylo nakonec ustoupeno. V reakci na tento požadavek začaly vznikat nové prototypy. Společnost GM (General Motors) vyrobila svůj vůz EV1 (obrázek 3), který byl k dispozici pouze na leasing a jeho olovené baterie umožnily dojezd až 160 km. V roce 1999 byla vytvořena druhá verze, která obsahovala efektivnější nikl-metal hydridovou baterii (NiMH), která zvýšila dojezd až na 225 km. Byl zde však tlak od samotné GM a ostatních výrobců proti elektromobilům, a tak v roce 2002 byla ukončena výroba s 1117 prodanými kusy. [8]

Obrázek 3GM EVI

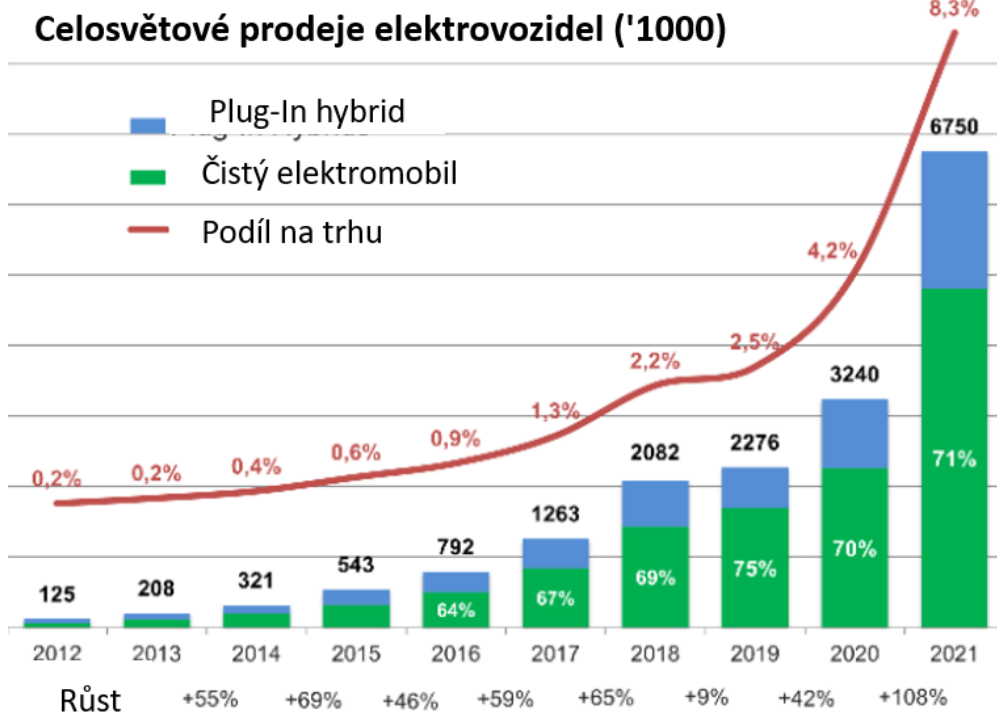


Zdroj: [9]

Toyota dovedla jako první na světě svůj hybridní Prius do velkosériové výroby. Prvním více rozšířeným automobilem čistě na elektrický pohon byla však Tesla Roadster uvedená v roce 2008 s dojezdem až 393 km, 53 kWh baterií a základní cenou \$109 000 (dnešních \$143 634 – 3 231 836 Kč). Tesla také jako první použila Lithium-iontové baterie místo olověných. O 2 roky později představil Nissan svůj model Leaf, který představoval ekonomičtější variantu s cenou \$31 600 (dnešních \$41 000 – 922 000 Kč). Jeho dojezd byl však pouze 160 km s 24 kWh baterií. Dlouho se jednalo o nejprodávanější elektromobil, než byl předstihnut společností Tesla, která uvedla v roce 2012 Model S s dojezdem až 430 km (85 kWh) a cenou \$80 000 bez započteného daňového zvýhodnění. Verze s kratším dojezdem byly samozřejmě levnější. [8, 17] Počínaje rokem 2020 společnost prodala 1 milion elektrických aut. Jejím úspěchu dopomohlo nabíjení na nabíjecích stanicích společnosti zdarma (do roku 2017) a daňové zvýhodnění podporující elektromobily částkou \$7500 [18–20].

Od uvedení Tesla Model S nastal „boom“ na poli elektromobilů. Bylo uvedeno několik menších a cenově dostupnějších automobilů (BMW I3, VW e-golf, Škoda Citigo iV,...). Jejich cena však byla vyšší než stejné verze se spalovacím motorem a dojezd byl menší. [21] Dále pokračuje mohutná expanze elektrovozidel (obrázek 4 následující stránky) s cílem splnit přísné emisní limity a vyhnout se pokutám.

Obrázek 4 Růst prodeje elektrovozidel



Upraveno a přeloženo z: [22]

4.2 Technologie elektrovozidla

Elektromobil je konstrukčně jednodušší než konvenční automobily. Neobsahuje spojku, vícestupňovou převodovku², turbodmychadlo, katalyzátor, DPF filtr (filtr pevných částic), nádrž, palivové potrubí s filtry, atd. To představuje i nižší servisní náklady na údržbu. Spalovací motor a jeho příslušenství obsahuje až 1400 jednotlivých dílů oproti elektromotoru s pouhými 200 díly. Na druhou stranu těžké a drahé baterie tvořící až 40 % celkové ceny elektrovozidla jsou jeho velkou nevýhodou. [5]

4.2.1 Elektromotor

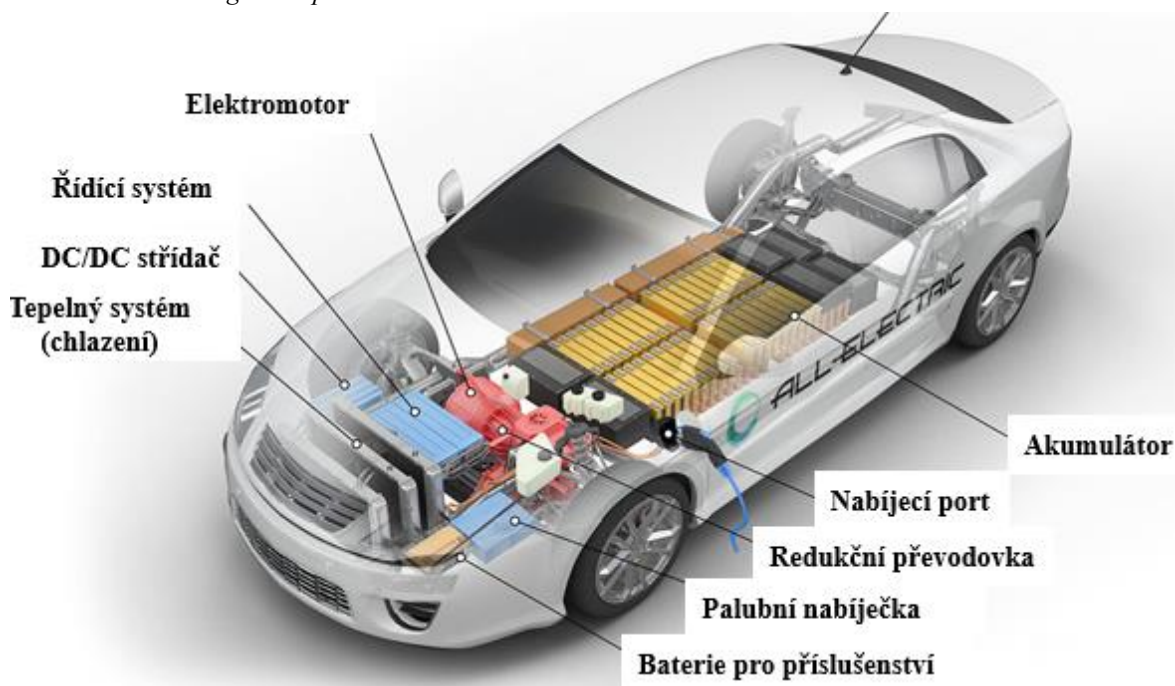
Elektropohon představuje mnoho výhod oproti konvenčním automobilům. Elektromotor generuje pohyb nikoliv teplo. Motory s fosilními palivy vytvářejí pohyb pomocí řízených explozí. Píst připojený ke klikové hřídeli a konající pohyb ve válci však vytváří tření, dochází také ke změně posuvného pohybu pístu na rotační pohyb klikové hřídele. To vše generuje velké množství tepla, tedy energie, která není využita pro pohyb

² Elektroauta nejčastěji využívají jednostupňovou převodovku. Nejedná se tedy o složitou převodovku jako u spalovacích motorů s více převodovými stupni. Vícestupňová převodovka zvýší celkovou účinnost až o 15 % a tím zvýší dojezd. [38]

vozidla vpřed. Oproti tomu elektromotor s hnací hřídelí má nulový kontakt – hnací hřídel je poháněna točivým magnetickým polem. I běžící elektromotor je sotva teplý na dotek.

Na druhou stranu část odpadního tepla u spalovacího motoru lze využít na vytopení prostoru kabiny. U elektrovozidel (obrázek 5) se musí využít energie z baterií a dochází tak ke snížení dojezdu při zapnutém topení nebo klimatizaci. Elektrický motor je jednodušší a tím i jeho výroba a údržba je levnější oproti spalovacímu motoru. Také je snadnější ho monitorovat a řídit. [23]

Obrázek 5 Technologické uspořádání elektrovozidla



Upraveno a přeloženo z: [24]

4.2.1.1 Princip elektromotoru

Elektromotor funguje na principu využití silových účinků magnetického pole, které vzniká při průchodu elektrického proudu. Dochází tak k vzájemnému přitahování a odpuzování dvou elektromagnetů nebo elektromagnetu a permanentního magnetu. Polaritu a sílu elektromagnetu lze řídit velikostí elektrického proudu, který jimi protéká. [25]

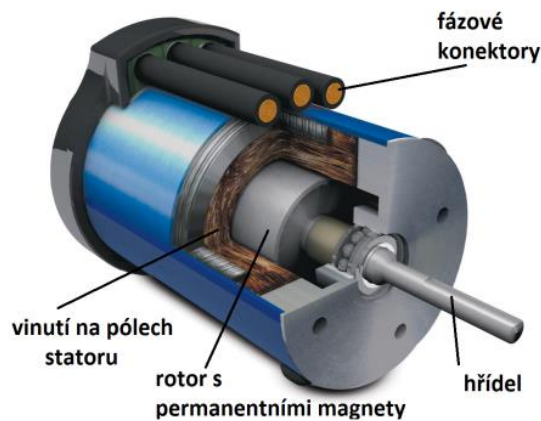
Při průchodu proudu na sebe působí magnetické pole rotoru a statoru, které vytvoří točivý moment. Ten uvede rotor s hřídelí do pohybu ve směru točivého pole. Dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou nebo mechanické energie na elektrickou, pokud je elektromotor využíván jako generátor. [25]

4.2.1.2 Konstrukce elektromotoru

Stator představuje pevnou součást elektromotoru a obvykle tvoří jeho vnější část konstrukce. Vinutí se skládá z cívek s navinutým měděným drátem. Při průchodu proudem cívkou vzniká magnetické pole statoru. [26]

Rotor je otáčející se část motoru, která je uložena obvykle uvnitř statoru. Je tvořena magnetickým obvodem, vinutím a hřídelí. [26]

Obrázek 6 Synchronní motor



Zdroj: [27]

Elektromotory lze dále rozdělit podle druhu napájecího proudu na: [12]

- Stejnoseměrné (DC).
- Střídavé (AC).

Nejpoužívanější jsou však střídavé motory, které lze dále rozdělit na:

- Synchronní s permanentními magnety.
- Asynchronní (indukční).

U synchronního motoru je rychlost otáčení rotoru a rotujícího magnetického pole (nachází se mezi rotorem a státorem) shodná. Rotor asynchronního motoru se však otáčí menší rychlostí než vzniklé magnetické pole. Rozdíl v počtu otáček se zde nazývá skluz. [12, 28]

Asynchronní (indukční) motor

Přivedený střídavý proud vytváří ve třífázovém vinutí statoru točivé magnetické pole, které indukuje proud v rotoru, což vede k vytvoření druhého rotorového magnetického pole. Vzájemném působení těchto dvou polí vzniká točivý moment, který roztočí rotor. Své využití najde u automobilů, které jezdí vyšší rychlostí po delší dobu na delší vzdálenost – dálniční provoz). [12] Dle [29] se indukční motory využívají zejména při pohonu všech kol v kombinaci spolu se synchronním motorem.

Výhody: [28]

- Jednodušší konstrukce, robustní, bezúdržbový, delší životnost a silně přetížitelný, může dosáhnout až 20000 ot/min.
- Nižší cena.

Nevýhody: [12]

- Vyšší ztráty, nižší účinnost.

Synchronní s permanentními magnety

Rotor s permanentním magnetem nepotřebuje dodatečný proud, protože jeho magnety poskytují potřebné magnetické pole nepřetržitě. Toto pole reaguje s magnetickým polem ve statoru, které vzniká přivedením proudu na trojfázové vinutí statoru. Opět tyto magnetické pole spolu interagují a výsledný točivý moment roztáčí rotor. [30]

Není ale ideální pro vysoce výkonné automobily, protože indukční motor může produkovat vyšší výkon. Jsou však výhodné k častému zastavování a k rozjezdu při nízkých rychlostech – provoz ve městě. [12, 23]. Většina elektromobilů při pohonu jedné hnací nápravy dle [29] obsahují právě synchronní elektromotor.

Výhody: [23]

- Je účinnější.
- Výkonová hustota je vyšší než u indukčních motorů se stejnými jmenovitými hodnotami.
- Nulové ztráty v budícím vynutí.
- Vyšší kroučící moment vztažený na hmotnost stroje.

Nevýhody: [12]

- Permanentní magnetické materiály jsou drahé a citlivé na vysoké teploty.

Každý typ motoru představuje jiné výkonové charakteristiky – jeden je optimalizován pro dosahování vyšších výkonů na úkor vyšší spotřeby energie a druhý pracuje efektivněji a umožňuje delší dojezd. To je také důvod, proč Tesla Model 3 a Škoda Enyaq při pohonu všech kol má indukční motor na přední nápravě a motor s permanentními magnety na zadní nápravě. To umožňuje využít vyšší výkon indukčního motoru, když je požadována rychlá akcelerace, a naopak využívat více výkonu od synchronního motoru při klidné jízdě. [31, 32]

Budoucí motory [23]

Konfigurace s motorem v kolech (obrázek 7) je poměrně výhodná v tom smyslu, že snižují hmotnost vozidla hnacího ústrojí tím, že se odstraní centrální motor, související převodovku, diferenciál, klouby a kloubové spojení hnacího hřídele. Poskytují také lepší ovládání, vyšší účinnost pohonu a více prostoru pro baterie, palivové články nebo náklad. Motor připojen k pohonným a řídicím systémům prostřednictvím vodičů, které se mohou poškodit vlivem drsného prostředí, vibrací a zrychlení, a způsobit tak vážné potíže. Dalším problémem je samotná hmotnost motoru (31 kg) uvnitř kol. Vzniká tak velká hmotnost neodpružené hmoty, která zhorší jízdní vlastnosti a přilnavost zejména na nerovné vozovce. [23]

Obrázek 7 Rozpad elektromotoru uvnitř kola



Upraveno a přeloženo z: [23]

4.2.2 Palubní nabíječka (On Board Charger – OBC)

Kontroluje proud a napětí, kterým je potřeba baterii nabíjet a stará se tak o životnost baterie. Výkon palubních nabíječek je v rozmezí 3,7 kW – 22 kW. Obsahuje AC/DC střídač (převodník) a DC/DC měnič napětí. [33]

4.2.2.1 AC/DC střídač

Elektrický proud se vyrábí jako střídavý (AC), protože je ho možné takto přenášet s menšími ztrátami na delší vzdálenosti. Baterie a integrované obvody moderní elektroniky však pro svou činnost potřebují stejnosměrný proud (DC). [34]

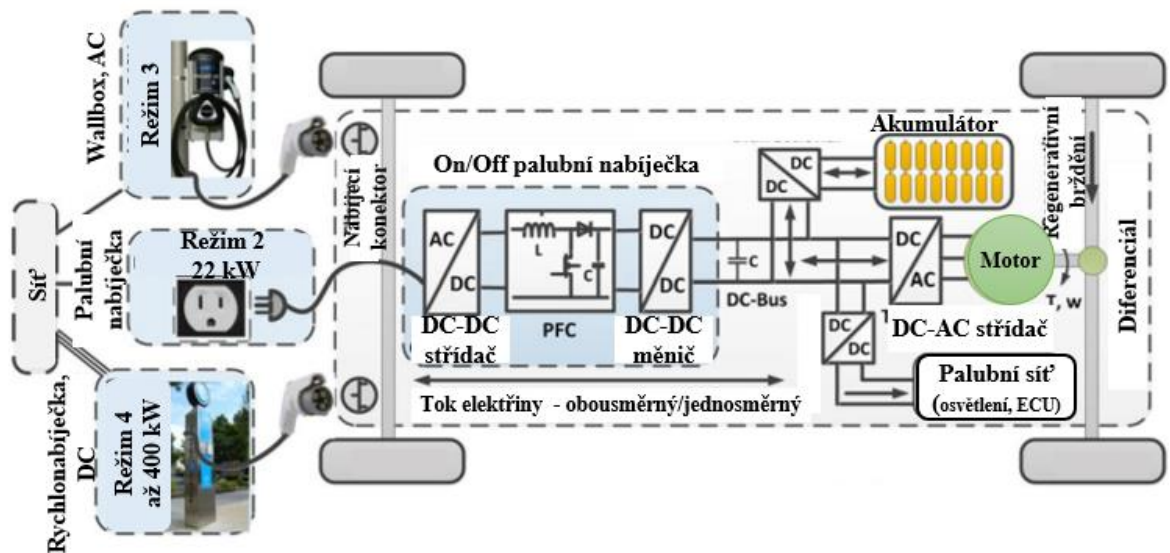
Při nabíjení na nízko rychlostní AC nabíjecí stanici prochází proud přes palubní nabíječku a AC/DC střídač mění střídavý proud na stejnosměrný, který dále prochází přes DC/DC měnič upravující velikost napětí a poté do akumulátoru vozidla (obrázek 8). [24]

Při nabíjení stejnosměrným proudem pomocí rychlonabíjecí DC stanice dochází ke konverzi střídavého proudu na stejnosměrný již v samotné rychlonabíjecí stanici a proud tak „obchází“ palubní nabíječku a proudí přímo do baterie. [12, 34]

V režimu jízdy směřuje energie z akumulátoru přes DC/DC měnič a poté přes DC/AC střídač, který přemění stejnosměrný proud baterie na střídavý, který se užívá v elektromotorech. Motor následně přemění elektrickou energii na mechanickou. Střídač může také zvýšit/snížit výkon nebo točivý moment motoru úpravou amplitudy signálu.

Během rekuperace dochází k přeměně kinetické energie na elektrickou. Střídavý proud prochází přes DC/AC střídač a výstupní stejnosměrný proud prochází přes DC/DC měnič do baterie. [35]

Obrázek 8 Schéma elektromobilu



Upraveno a přeloženo z: [36]

4.2.2.2 DC/DC měnič

V elektrovozidle se nachází také dva napěťové systémy: [23]

- Vysokonapěťový – zahrnuje primární zdroj energie (baterie, palivový článek)
- Nízkonapěťový – je tvořen DC-DC konvertorem, palubní sítí vozidla

Podílí se na změně výstupního napětí, které tak upravuje. Palubní DC-DC měnič přijímá vysoké napětí z primárního zdroje energie (200 V-800 V) a upravuje ho na nízké napětí pro palubní síť (12 V nebo 24 V). Palubní síť napájí řadu prvků – posilovač řízení a brzd, řídicí systém pohonu, palubní baterii, infotainment atd. [23, 36]

4.2.3 Elektronický řídicí systém (Electronic Control Unit – ECU)

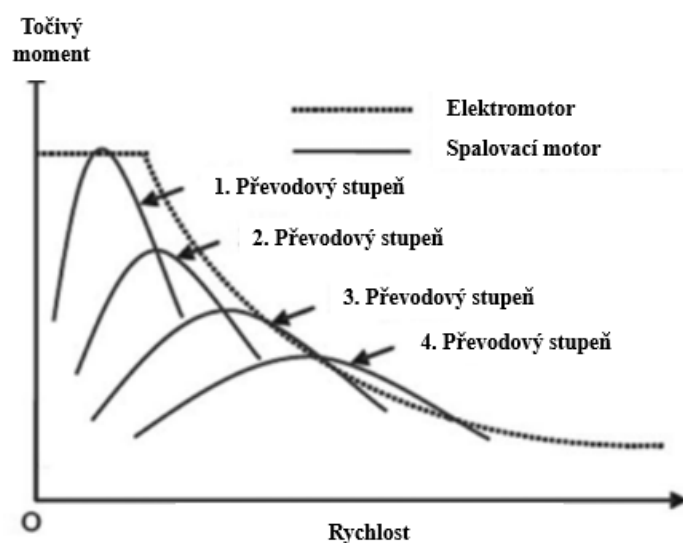
Obvykle tvoří decentralizovaný systém, kdy moderní automobil obsahuje až 80 modulů ECU, jejichž činnost je koordinována centrální jednotkou, která tvoří „mozek“ vozidla. Centrální jednotka také obvykle zpracovává vstupy od řidiče (poloha plynového, brzdového pedálu, řadicí páky atd.) ECU snímá různá vstupní data ze snímačů (senzorů) a řídí mnoho různých funkcí ve vozidle (ovládání motoru, dveří, infotainment atd.) [23, 36]

Hlavní součástí ECU je procesor, který řídí požadované funkce. Její kryt je voděodolný a odolný vibracím, protože může být instalován v místě vystaveném nepříznivým provozním podmínkám. Jednotlivé jednotky spolu vzájemně komunikují pomocí společné sběrnice, která je založena na standardu CAN (Control Area Network). [23]

4.3 Provozní vlastnosti elektropohonu

Při nižších rychlostech poskytují elektromotory vyšší točivý moment než spalovací motory viz. obr 9. Točivý moment je také téměř okamžitě k dispozici již od nulových otáček. Rozbíhají se s maximální tažnou silou do vyšší rychlosti, což je předpoklad pro rychlý rozjezd. Tyto výhody činí z elektromobilu ideální vozidlo v městských oblastech. Momentová charakteristika spalovacího motoru však vyplňuje pouze částečně provozní pole automobilu (obrázek 9 na následující stránce), proto konvenční vozidlo potřebuje víceúrovňovou převodovku a spojku. [12] V příloze 1 a 2 lze také najít graf účinnosti spalovacího motoru a elektromotoru, který nabízí vyšší účinnost pro širší spektrum otáček a točivého momentu. [37]

Obrázek 9 Charakteristika: točivý moment-rychlost



Přeloženo a upraveno z: [37]

Vzhledem k tomu, že elektromotor dosahuje maximálního momentu ve velkém rozsahu pracovních otáček, nepotřebuje vícestupňovou převodovku. Jeho otáčky mohou dosahovat až 20 000 ot/min. Takovou rychlostí se však nemohou otáčet kola. V praxi stačí redukční převod (jednostupňová převodovka) s poměrem např. 8,27:1 (Tesla Roadster), který redukuje otáčky a v součinnosti s diferenciálem³ obstarává pohon hnací nápravy. [38, 39]

Při volbě zpátečky dojde k přepólování statoru, rotor se začne otáčet opačným směrem a vůz couvá. Počet otáček se řídí změnou frekvence střídavého napájení.[28]

4.3.1 Rekuperace

Každý elektrický motor funguje zároveň i jako generátor. Při regenerativním brzděním je elektropohon poháněn otáčejícími se koly a dodává (generuje) elektřinu zpět do baterie. Rotor se přitom otáčí stále stejným směrem, ale změní se polarita elektrického pole. To odešle elektrony zpátky do baterie, zatímco vozidlo zpomaluje úbytkem přeměny kinetické energie na elektrickou. To má pozitivní efekt na menší opotřebení brzdové soustavy. Při prudším brzdění je však efekt rekuperace nedostatečný a funkci musí převzít klasické třecí brzdy. Regenerativní brzdění funguje pouze na hnacích kolech. [23]

³ Při použití dvou elektromotorů na hnací nápravě, kdy každý motor pohání své příslušné kolo, přítomnost mechanického diferenciálu odpadá. [23]

4.4 Varianty elektrických vozidel

Elektromobil může být poháněn čistě na elektrický pohon nebo může spolupracovat se spalovacím motorem. Lze je rozdělit do čtyř základních kategorií: [40]

- Bateriově poháněné elektrické vozidlo (BEV – Battery Electric Vehicle).
- Hybridní elektrické vozidlo (HEV – Hybrid Electric Vehicle),
- Plug-in hybridní elektrické vozidlo (PHEV – Plug-in Electric Vehicle).
- Elektrické vozidlo s palivovými články (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle).

4.4.1 Bateriové elektrické vozidlo

Vozidlo je poháněno výhradně elektromotorem pomocí elektrické energie, která je uložena ve velkém akumulátoru tvořící značnou hmotnost a cenu vozidla. Baterie tvoří až 40 % celkové ceny automobilu. Dojezd těchto vozidel je dnes běžně mezi 300 – 500 km. [41] Nový Mercedes EQS 450+ (2021) však nabízí až 782 km dle WLTP⁴, [42] Dojezd závisí na stylu jízdy, klimatických podmínkách, konfiguraci vozidla, typu a stáří baterie. Doba nabíjení však stále není srovnatelná s dobou potřebnou k doplnění palivové nádrže. Výhodou EV je jejich jednoduchá konstrukce, obsluha, pohodlí.

4.4.2 Hybridní vozidla (HEV)

O pohon hybridních vozidel se nejčastěji stará kombinace spalovacího motoru a elektrického. Zkombinováním obou pohonů lze snížit spotřebu paliva a tím i emise, ale zároveň zajistit standartní dojezd automobilu. HEV využívá elektrický pohon v situacích, kdy je potřeba energie nízká (jízda v městských oblastech s nízkou rychlostí). Když je potřeba jízda při vyšší rychlosti, HEV přepne na spalovací motor. Oba motory mohou, ale i spolupracovat při potřebě vyššího výkonu nebo odstranění prodlevy turbodmychadla u přeplňovaných motorů. Spalovací motor zůstává během volnoběhu zcela vypnutý. [43]

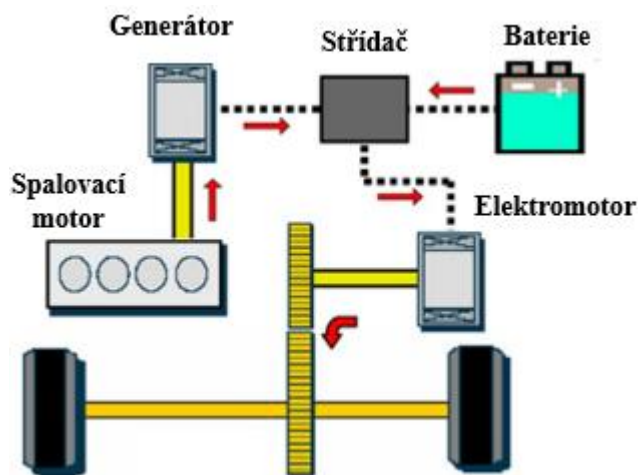
4.4.2.1 Sériový hybrid

Vozidlo je poháněno primárně elektromotorem. Jako zdroj energie zde však slouží spalovací motor, který mechanickým spojením pohání generátor vyrábějící elektřinu. Ta je

⁴ Jízdní cyklus měřící spotřebu paliva/energie je celosvětově harmonizovaný pro testování malých osobních a užitkových vozů. Poskytuje reálnější údaje o spotřebě paliva/energie na základě předem daných dynamických testovacích parametrů. [76]

poté využita přímo pro pohon vozidla nebo dobíjí baterie. Komponenty tohoto sériového uspořádání jsou uspořádány za sebou (sériově) – obrázek 10. Spalovací motor není mechanicky spojen s hnací nápravou. Tento typ vozidel se také někdy nazývá elektrické vozidlo s prodlouženým dojezdem. [11]

Obrázek 10 Schéma sériového hybridu při jízdním režimu



Přeloženo a upraveno z: [44]

Výhody:

Výhodou je, že spalovací motor je tak provozován ve velmi úzkém rozsahu optimálních otáček, při kterém dosahuje nejvyšší účinnosti. Neobsahuje také mechanické spojení spalovacího motoru a kol čímž odpadá nutnost klasické převodovky – je zde pouze redukční převod. Vhodné do městského provozu. [28]

Nevýhody:

Více násobná přeměna energie (tepelná energie na mechanickou a mechanická na elektrickou a poté opět na mechanickou. Nevhodné pro dlouhý mimoměstský provoz – nižší účinnost než paralelní hybrid. Je také potřeba větší kapacita akumulátoru k provozu a elektromotor musí být větší než u paralelního uspořádání, protože zajišťuje veškerou hnací sílu a její přenos na kola. [45]

BMW I3 REx (Range Extender – prodloužení dojezdu)

Oproti čistě elektrické verzi obsahuje navíc dvouválcový benzínový motor o objemu 647 cm³ s výkonem 25 kW. Pomocí nádrže na 9 litrů paliva je schopný prodloužit dojezd vozidla o 120 km. Čistý elektrický dojezd s akumulátory o kapacitě 18,8 kWh je 120 – 150 km. [46]

4.4.2.2 Paralelní hybrid

Spalovací motor spolu s elektromotorem a s koly je propojen pomocí mechanické převodovky (obrázek 11). Elektromotor i motor jsou zapojeny vedle sebe – paralelně a k pohonu automobilu je využit jeden z nich nebo oba najednou (točivé momenty jsou pak součtem obou zařízení). Obvykle spalovací motor dodává většinu výkonu a elektromotor se připojuje v případě potřeby akcelerace a zvýšení výkonu. Automobily při zastavení vypínají spalovací motor. Pokud je rozjezd a jízda pomalá, využívá se pohon elektromotoru. Při vyšších rychlostech zajišťuje pohon spalovací motor, který je provozován v nejučinnějším bodě a lze dosáhnout vyšší účinnosti. [11, 28, 47]

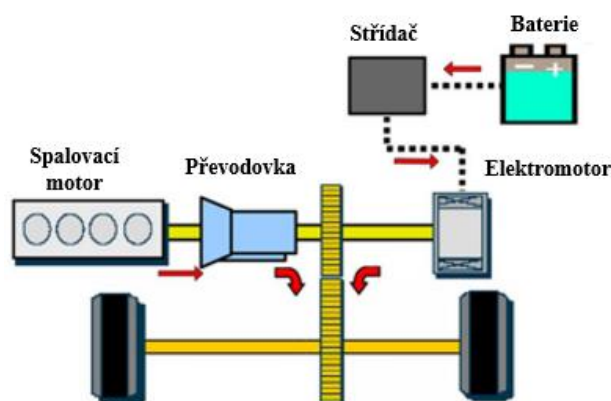
Výhody:

Vyšší točivý moment daný součtem obou motorů. Není zde vícenásobná přeměna energie ze spalovacího motoru - ztráty jsou tak menší. Pohon je kompaktnější, protože zde není generátor a elektromotor je také menší oproti sériovému hybridu. [11]

Nevýhody:

Složitější převodové ústrojí. Spalovací motor a elektromotor mají stejné otáčky a není možné nastavit pracovní bod spalovacího motoru tak, aby bylo dosaženo maximální účinnosti při daném výkonu. [11]

Obrázek 11 Schéma paralelního hybridu při jízdním režimu



Upraveno a přeloženo z: [44]

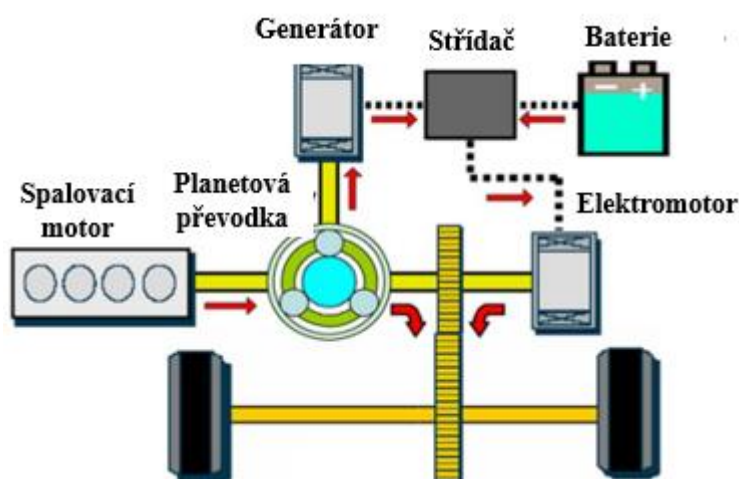
Toyota Prius

Paralelní hybrid s kombinovanou spotřebou 4,6 l/100 km (emise – 104 g CO₂/100 km). Kapacita akumulátoru je pouhých 1,3 kWh. [48]

4.4.2.3 Kombinovaný hybrid

Přepíná mezi sériovým a paralelním režimem a kombinuje tak výhody obou dvou hybridních uspořádání (obrázek 12). Hybrid má také navíc jeden elektromotor, který funguje jako generátor energie. Dělič výkonu na základě informací z řídicí jednotky distribuuje výkon ze spalovacího motoru nebo z elektromotoru případně obou typů pohonu v závislosti na způsobu jízdy. [11]

Obrázek 12 Schéma kombinovaného hybridu při jízděm režimu



Přeloženo a upraveno z: [44]

Jízděm režimy: [49]

Rozjezd, pomalá jízda

Spalovací motor je vypnutý, protože by běžel v neekonomickém režimu, vozidlo pohání jen elektromotor.

Normální jízda

Výkon spalovacího motoru je rozdělen v rozdělovacím soukolím mezi nápravu a generátor, který dodává energii do baterie v době, kdy by měl běžet bez zátěže.

Plná akcelerace

Při plném sešlápnutí akceleračního pedálu pohání vozidlo oba motory.

Decelerace a brzdění

Kinetická energie vozidla se využívá k pohonu elektromotoru, jenž zastává funkci generátoru, který dobíjí baterie

Dobíjení baterií

Poklesne-li napětí baterií, začnou se dobíjet proudem z generátoru.

4.4.3 Plug in Hybrid (PHEV)

Jsou také hybridní vozidla, která jsou poháněna konvenčním spalovacím motorem a elektromotorem jako u HEV, hlavním rozdílem je však, že akumulátor je možno nabíjet pomocí extérního zdroje energie (nabíjecí stanicí). Vozidlo může jet i výhradně na elektrický pohon. Potřebuje pro to i větší baterie. [43]

Toyota Prius Plug-in hybrid

Dosahuje kombinované spotřeby 1,2 l/100 km (emise – 28 g CO₂/100 km). Kapacita akumulátoru je 8,8 kWh a slibuje dojezd až 50 km čistě na elektrický pohon. [50]

4.4.4 Elektrické vozidlo s palivovými články - FCEV

Automobily obsahují palivové články, které využívají chemické reakce k výrobě elektrické energie. Vyrábějí si elektřinu sami přímo na palubě. Při reakci reaguje vodík, který je stlačený ve vysokotlakých nádržích, a kyslíku získaného ze vzduchu. Voda je zde jediný odpadní produkt, který vzniká touto reakcí a je vypouštěna výfukovým potrubím. Elektřina vyrobená z palivových článků pohání elektromotor. Přebytková energie je uložena v bateriích. Vozidla jsou také považována, že produkují během jízdy nulové emise. [23]

Výhodou je, že doplňování paliva trvá stejnou dobu jako doplnění benzínu. [51] V České republice však chybí síť vodíkových čerpacích stanic. Vozidlo obsahuje pouze menší baterie, které nejsou tak těžké jako u elektromobilu. [52]

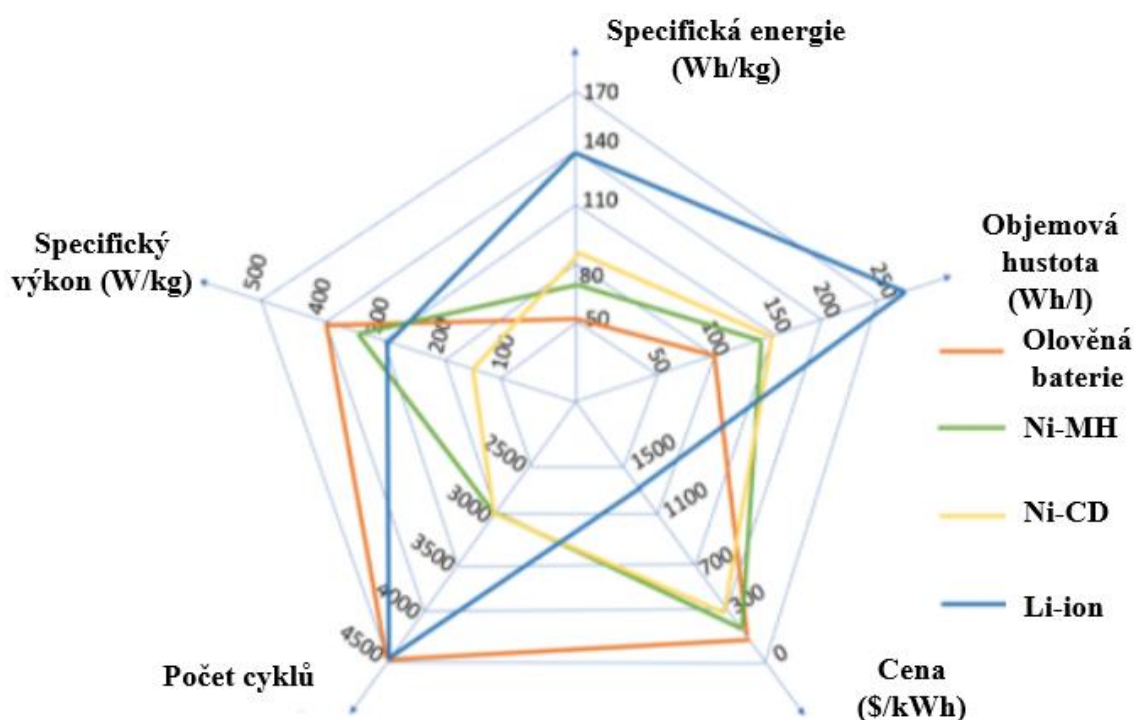
Nevýhodou je vysoká cena palivových článků kvůli vysokému obsahu vzácných kovů a výroba vodíku, která se nejčastěji získává jako nepřímý produkt při zpracování ropy, zemního plynu nebo elektrolýzou, která je energeticky náročná a tedy drahá. Problém představuje i skladování vodíku, který se musí skladovat pod vysokým tlakem. Výraznou nevýhodou je celková účinnost, která od výroby vodíku přes skladování, transport a závěrečnou konverzi z palivových článků činí pouhých 38%. [53]

4.5 Baterie

Baterie jsou primárním zdrojem energie pro EV, dalším jsou palivové články. S rostoucím počtem elektromobilů se zvyšuje celosvětová produkce baterií, což umožňuje snižovat jejich cenu. První vozidla obsahovala olovený akumulátor s elektrolytem tvořeným kyselinou sírovou (Lead Acid Battery). Jejich zdokonalením byly vyrobeny tzv. VRLA

akumulátory, které umožnily nabití z 10 % na 90% kapacity za 30 minut. Poté se přešlo na NiCD a NiMH akumulátory, které mají lepší vlastnosti než předchozí typy. V poslední době se však využívají články na bázi lithia. [12] Lithiové články umožňují poměrně velký počet cyklu a obsahují z jednotlivých typů baterií nejvíce specifické energie (obrázek 13). Nutno podotknout, že ačkoliv je publikace [54] z roku 2020, cena za kWh se pohybuje okolo \$132 [54].

Obrázek 13 Srovnání jednotlivých typů baterií



Přeloženo z: [55]

Jednotlivé články jsou tvořeny do větších skupin, které tvoří moduly. Pokud dojde k porušení jednoho článku, je možno tak vyměnit pouze daný modul a nemusí se nahradit tak celá baterie. Součástí baterie jsou senzory, které monitorují její teplotu, napětí a proud. [23].

4.5.1 Charakteristiky akumulátoru

Obtížnost a cena skladování je jedním z hlavních problémů elektrické energie a akumulátor vozidla tak činí nejen velkou část ceny vozidla ale i jeho hmotnosti. Z tohoto důvodu se stále pracuje na vývoji nových baterií s vyšší účinností.

4.5.1.1 Kapacita

Představuje maximální množství energie, které lze z baterie za určitých podmínek získat. Je to schopnost, kterou je baterie dodat stanovený výkon (kW) po určitou dobu. Vyjadřuje se tedy ve watthodinách (Wh) nebo kilowatthodinách. Někdy je udávána v ampérhodinách (Ah). Vynásobením Ah napětím baterie pak získáme energii ve Wh. ($Wh = Ah \times V$). Kapacita akumulátoru ovlivňuje dojezd automobilu spolu s dalšími faktory (rychlost, venkovní teplota atd.). [23]

Baterie mají svoji maximální kapacitu (množství energie, které lze teoreticky do baterie dostat) a využitelnou kapacitu (signalizovaná palubním infotainmentem), která je nižší z důvodu, aby se zajistila optimální životnost baterie a ochrana baterie před poškozením vlivem nadměrného vybití. Škoda Enyaq má kapacitu akumulátoru 82 kWh s využitelnou kapacitou 77 kWh. Kapacita se také snižuje stářím akumulátoru a rychlonabíjením. [56]

Rychlost nabíjení a vybíjení

Míra vybíjení/nabíjení baterie v poměru k její maximální kapacitě. Rychlost 1C znamená, že vybíjecí proud vybijí celou baterii za 1 h. Pro baterii s kapacitou 100 Ah to znamená vybíjecí proud 100 A. Rychlost C/2 by byla 50 A.

4.5.1.2 Vnitřní odpor

Je definován jako odpor vůči toku elektrického proudu uvnitř baterie. Ovlivňuje tak maximální výkon, kterým lze baterii vybíjet nebo nabíjet a ovlivňuje tepelné ztráty uvnitř baterie. Odpor uvnitř baterie se liší v závislosti na teplotě a závisí také na stavu nabití, vybití a stáří baterie. S rostoucím vnitřním odporem klesá účinnost baterie a snižuje se tepelná stabilita, protože proud procházející baterií se přeměňuje na teplo. Nahromaděná tepelná energie způsobuje postupnou degradaci elektrolytu, elektrod, separátu a snižuje kapacitu a životnost baterie. Při nízkých teplotách se chemické reakce uvnitř baterie zpomalí (vyšší odpor), prodlouží se doba nabíjení. Při vyšších teplotách naopak dojde k urychlení reakcí. [57, 58].

4.5.1.3 Hustota elektrické energie

Existují dva odlišné typy energetické hustoty: [23]

- Objemová hustota (Wh/L)

Nominální energie baterie na jednotku objemu, někdy označovaná jako objemová hustota energie. Měrná energie je charakteristikou chemického složení baterie a jejího obalu. Spolu se spotřebou energie vozidla určuje velikost baterie potřebnou k dosažení daného elektrického dojezdu. Parametr tedy definuje, kolik místa baterie zabere na místě aplikace.

- Specifická hustota (Wh/kg)

Nominální energie baterie na jednotku hmotnosti. Někdy se označuje jako gravimetrická hustota energie. Měrná energie je charakteristikou chemického složení baterie a jejího obalu. Spolu se spotřebou energie vozidla určuje hmotnost baterie potřebnou k dosažení daného elektrického dojezdu. Cílem je získat co největší energetickou hustotu. Neboli – čím větší energetická hodnota, tím větší množství lze uložit do akumulátoru stejné hmotnosti nebo stejné množství energie může být uloženo do baterie o menší hmotnosti – zvýšení účinnosti). Základní jednotky jsou Wh/kg. Energetická hustota klasických paliv je cca. 12 000 Wh/kg paliva, přičemž článek baterie dokáže uskladnit pouze 170 Wh na kilogram své hmotnosti. To je důvod, proč baterie tvoří značnou hmotnost automobilu. [5]

4.5.1.4 Výkonová hustota (W/l)

Měrný výkon je charakteristikou chemického složení baterie a jejího obalu. Určuje velikost baterie potřebnou k dosažení daného výkonnostního cíle. [23]

4.5.1.5 Specifický výkon (W/kg)

Výkon, který může baterie dodat na jednotku hmotnosti. Specifický výkon je charakteristikou chemie a balení baterie, která určuje hmotnost baterie potřebnou k dosažení daného výkonového cíle. [23]

V závislosti na aplikaci, lze baterie vyrobit přizpůsobené na delší dojezd (s vyšší specifickou energií nebo pro poskytování vyššího výkonu při akceleraci (vyšší specifický výkon), případně jít cestou kompromisu.

4.5.1.6 Stav nabití SOC (State of Charge)

Vztahuje se k úrovni baterie s ohledem na její 100 % kapacitu (0 % - prázdná – 100 % - plná). [23]

4.5.1.7 Hloubka vybití (Depth Of Discharge – DOD)

Parametr určující, jak moc je baterie vybitá vzhledem k své plné kapacitě. Li-Ion bateriím neschází hluboké vybíjení. Vzhledem k tomu, že baterie netrpí paměťovým efektem, lze je často nabíjet a vybíjet. V tabulce 1 jsou uvedeny počty cyklů, které baterie může vykonat než její využitelná kapacita klesne na 70% původní kapacity. [59]

Tabulka 1 Hloubka vybití a počet cyklů NMC a LiPO4 baterie

| Hloubka vybití | Počet cyklů | |
|----------------|-------------|-------|
| | NMC | LiPO4 |
| 100 % DOD | 300 | 600 |
| 80 % DOD | 400 | 900 |
| 60 % DOD | 600 | 1500 |
| 40 % DOD | 1000 | 3000 |
| 20 % DOD | 2000 | 9000 |
| 10 % DOD | 6000 | 15000 |

Přeloženo a upraveno z: [59]

Nabíjecí cyklus

Cyklus je dokončen, když je baterie spotřebována nebo nabita na 100 %. Skutečná provozní životnost baterie je ovlivněna rychlostí a hloubkou cyklů a dalšími podmínkami, jako je teplota a vlhkost. Čím vyšší je DOD, tím nižší je počet provedených cyklů. [23]

4.5.1.8 Napětí článku

Napětí článků ovlivňuje životnost baterie. Li-Ion akumulátor se nabíjí na napětí 4,2 V na článek. To představuje životnost okolo 500 cyklů (tabulka 2). Snižováním napětím se prodlužuje životnost, ale snižuje se množství naakumulované energie (dojezd), kterou lze využít. Vzhledem k tomu, že proces však není nevratný, opětovným dobitím lze opět získat maximální kapacitu. Každý 70 mV pokles v napětí článku snižuje kapacitu o 10 %. Výše uvedené je také důvodem, proč se doporučuje dobíjet do 80 % pro delší životnost. [59]

Tabulka 2 Závislost nabití článku na počtu vybíjecích cyklů a množství energie

| Úroveň nabití [V/článek] | Počet vybíjecích cyklů | Množství dostupné energie |
|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| 4,2 | 300–500 | 100 % |
| 4,15 | 400–700 | 90–95 % |
| 4,10 | 600–1000 | 85–90 % |
| 4,05 | 850–1500 | 80–85 % |
| 4,00 | 1200–2000 | 70–75 % |
| 3,90 | 2400–4000 | 60–65 % |

Přeloženo a upraveno z: [59]

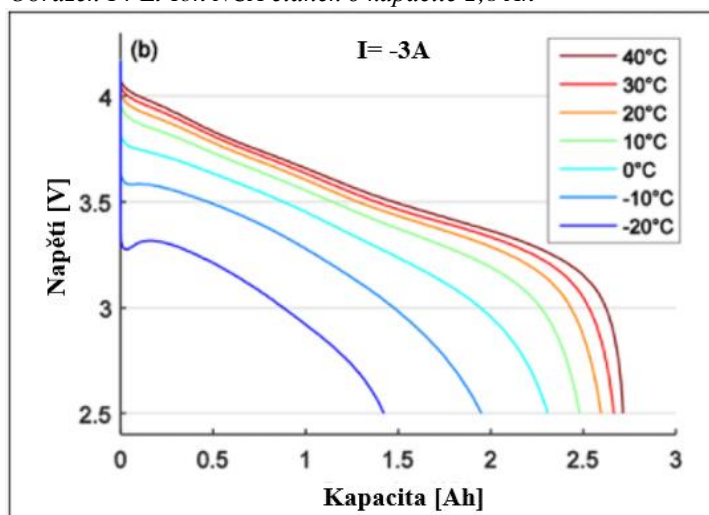
4.5.1.9 Stav zdraví baterie (State Of Health – SOH)

Zbývající kapacita baterie jako % původní využitelné kapacity. [23]

4.5.1.10 Teplota

Baterie nejlépe fungují při pokojové teplotě (20 °C), která jim umožňuje nejdelší životnost. Při vyšších teplotách, je výkon baterie vyšší, protože se zrychlují chemické reakce probíhající v článku, ale snižuje se jeho životnost. Baterie, která poskytla 100 % své kapacity při 27 °C je schopna dodat pouze 50 % své kapacity při -18 °C (obr. 14). [60]

Obrázek 14 Li-Ion NCA článek o kapacitě 2,8 Ah



Upraveno a přeloženo z: [60]

4.5.2 Systém správy baterie (Battery Management System)

Sleduje výkon jednotlivých článků baterie, aby zajistil jejich správnou funkci a dlouhou životnost. Dochází tedy k monitorování: celkového napětí, napětí jednotlivých

článků, maximální a minimální napětí článků, teploty jednotlivých článků, ale i chladicí kapaliny). BMS také využívá měření jednotlivých článků k určení stavu nabití trakčního akumulátoru a na základě stylu jízdy vypočítá a zobrazí na infotainmentu vozidla odhadovaný dojezd. [23]

Kontrola jednotlivých článků baterie je velmi důležitá. Případný tepelný únik by mohl způsobit požár. Tepelné úniky může způsobit například přehřívání baterie, proto musí BMS neustále monitorovat a detekovat odchylky v parametrech. Pokud se začne nějaký článek přehřívat, je třeba ho odpojit od systému baterie. BMS musí mít ještě kontrolní systém nad sebou, který monitoruje, zda upozornění na poškození jsou oprávněná a nejedná se pouze o chybné hlášení BMS. [23]

4.5.2.1 Balancování baterií

Bateriové články jsou zapojeny sériově a paralelně. Hlavní funkcí systému BMS je vyrovnávat stovky bateriových článků, které poskytují dostatečné napětí pro napájení přidružených trakčních motorů, které mohou pracovat s napětím 200 až 800 V a mít výkon až 100 kW nebo více. Výkon celé trakční baterie je omezen jeho článkem s nejnižší kapacitou. Jakmile je nejslabší článek vyčerpán, je fakticky vyčerpána celá trakční baterie. Paralelní články si budou napětí vzájemně vyrovnávat. U sériově zapojených článků určuje nejslabší článek bod vybití akumulátorové sady.

4.6 Nabíjení

U konvenčních vozidel zabere tankování okolo 10 minut (manipulace, čekání ve frontě, placení), kdežto u elektrovozidel se však jedná o desítky minut. Jak dlouho se bude akumulátor nabíjet záleží na několika faktorech: [61]

- Maximální výkon, který může nabíjecí stanice doručit v kW.
- Zda se jedná o nabíjecí stanici se střídavým proudem (výkon do 22 kW nebo se stejnosměrným (výkon nad 22 kW).
- Palubní nabíječka, která udává, jaký výkon v kW může být použitý na nabití baterie.
- Kapacita baterie.
- Teplota okolí a stav baterie také ovlivňuje nabíjení.

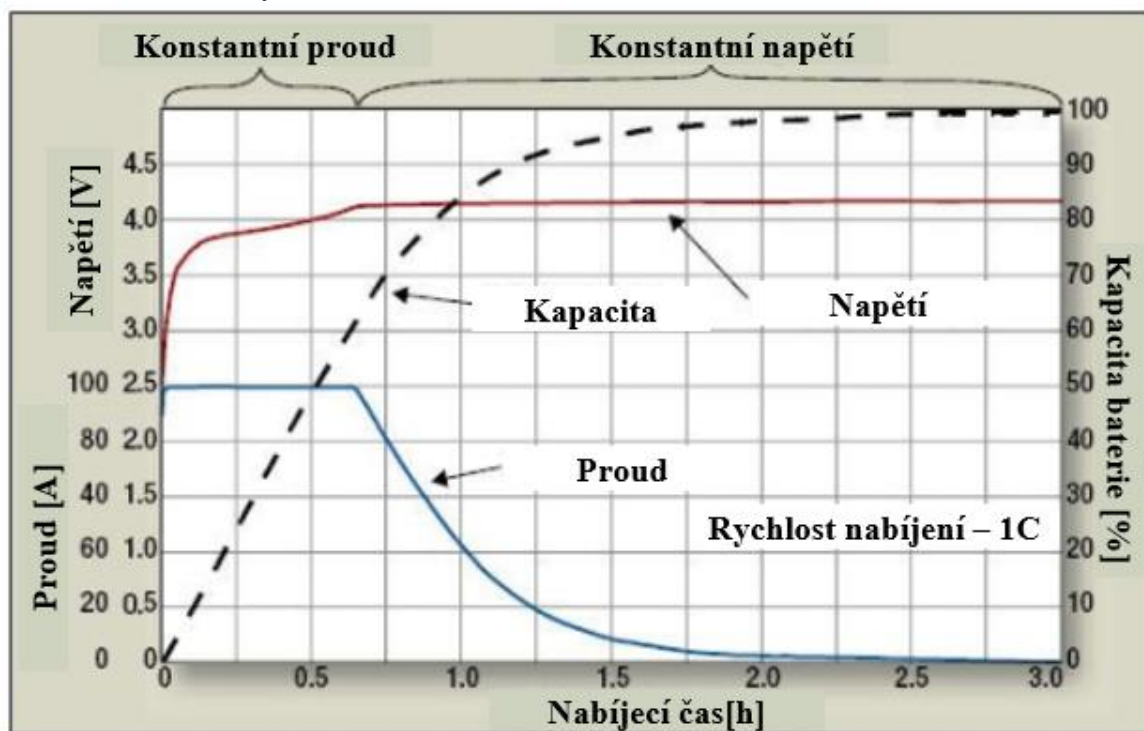
4.6.1 Průběh nabíjení

Lithium-iontové baterie jsou nejčastěji nabíjeny pomocí CC/CV způsobu: [62]

- Nabíjení konstantním proudem (CC režim) – Rychlé nabíjení
- Nabíjení konstantním napětím (CV režim) – Pomalé nabíjení

Nejprve dochází k nabíjení pomocí konstantního proudu se zvyšujícím se napětím. Jakmile jeden článek dosáhne svého maximálního nabíjecího napětí (4,2V), dojde k tzv. nabíjení konstantním napětím. Hodnota proudu exponenciálně klesá, zatímco hodnota napětí se udržuje na konstantní hodnotě. To umožňuje dobít veškeré články o zbyvajících kapacitu do 100 % při vyrovnávání jednotlivých článků. Jakmile každý článek je vybalancován a dosáhl plného napětí, trakční akumulátor je 100% nabitý. Obrázek 15 také vysvětluje důvod, proč do 80 % se akumulátor nabíjí rychle a zbylých 20 % trvá někdy stejnou dobu jako z 0 – 80 %. [62]

Obrázek 15 Průběh nabíjení

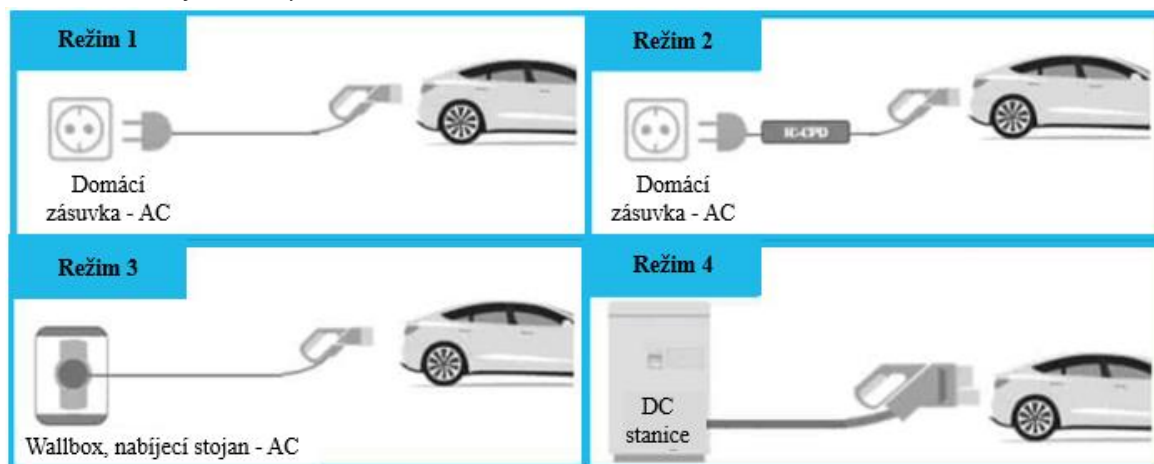


Přeloženo a upraveno z: [62, 63]

4.6.2 Nabíjecí režimy

Evropská norma IEC-61851 (obr.16) definuje následující režimy nabíjení: [64, 65]

Obrázek 16 Nabíjecí režimy



Přeloženo a upraveno z: [65]

4.6.2.1 Režim 1

Domácí pomalé nabíjení pomocí střídavého proudu (AC) z klasické zásuvky jednoduchým prodlužovacím kabelem, bez jakýchkoliv bezpečnostních zařízení. Domácí zásuvka sice má pojistku, ale je pomalá. Toto nabíjení se nedoporučuje. Obyčejnou jednofázovou 230 V zásuvkou může protékat maximální proud 16 A. Maximální výkon, který je možné získat je 3,7 kW, pokud neuvažujeme ztráty).

4.6.2.2 Režim 2

Rovněž se jedná o dobíjení (polo-rychlé) střídavým proudem ze zásuvky. Nabíjecí kabel však obsahuje zařízení IC-CPD (In-Cable Control and Protection Device), který řídí celý proces nabíjení. Při využití třífázové 400 V zásuvky s protékajícím proudem 16 A lze získat výkon 11 kW. Pokud se použije 32 A třífázová zásuvka, lze získat nabíjecí výkon až 22 kW v domácích podmínkách. To zde však již naráží tzv. efekt úzkého hrdla láhve – palubní nabíječky. Např. Škoda Enyaq s palubní nabíječkou (11 kW), tak nemůže na nabíjecích stojanech využít 22 kW, ale pouze 11 kW.

4.6.2.3 Režim 3

Nabíjí se ze zařízení jménem Wallbox nebo nabíjecího stojanu. Samotné zařízení kontroluje dobíjení, ověřuje, že je elektrické vozidlo správně připojeno k nabíjecímu zařízení. Použití vyhrazeného a nezávislého elektrického obvodu eliminuje riziko připojení k nevyhovující instalaci, čímž je zaručena bezpečnost majetku a osob. Zajišťuje optimální nabití baterií a šetří jejich životnost. Maximální výkon 22 kW.

4.6.2.4 Režim 4

Tento typ dobíjecí stanice je již označován jako DC stanice. Obsahuje uvnitř střídač, který převádí střídavý proud na stejnosměrný. Tento proud již nepřechází do palubní nabíječky, ale přímo do akumulátoru přes DC/DC měnič. Nabíjecí výkon dosahuje až 400 kW. Maximální nabíjecí proud 400 A a napětí 1000 V. Mluví se o rychlém případně ultrarychlém nabíjení.

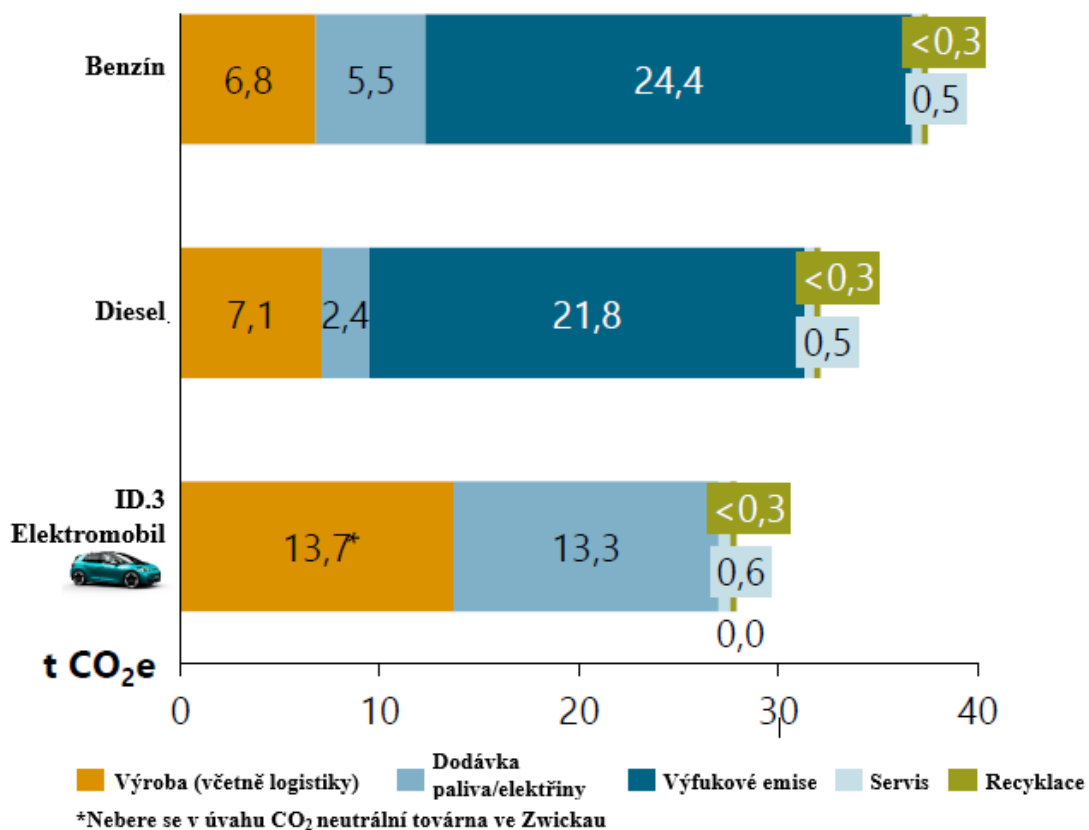
4.7 Vliv na životní prostředí

Z hlediska posuzování vlivu jednotlivých vozidel na životní prostředí je nutno brát ohled na celý životní cyklus automobilu od těžby nerostných surovin, výrobu až po ukončení jeho života. Jednotlivé skleníkové plyny přistupují různou mírou k oteplování planety. Proto se veškerý jejich účinek přepočítává na 1 kg (CO₂e; e-ekvivalentní). Elektromobily během fáze svého provozu neprodukují žádné emise z výfuku⁵. Jsou tedy během provozu bezemisní a tedy CO₂ neutrální. Problém se však z fáze užívání přesunul do fáze výroby. Výroba baterií je energeticky náročná a předpokládá se, že stojí za 40 – 50 % celkových emisí vyprodukovaných elektromobilem za celý jeho životní cyklus. Cílem je tedy, vozidla na elektrický pohon dosáhly produkce nižších emisí než konvenční automobily během fáze užívání vozidla – před následnou recyklací. Jinak by výroba a provoz elektrovozidel nedával smysl. [66]

⁵ Emise však stále vznikají při výrobě elektřiny, pokud není vyráběna z obnovitelných zdrojů.

Na obrázku 17 je porovnání benzínového a dieselového vozidla VW Golf 8 s elektrickým VW ID3 po ujetí 200 000 km. VV ID3 má 62 kWh NMC akumulátor a elektřina pochází z energetického mixu Evropy. [66] Čím více bude elektřiny pocházet z obnovitelných zdrojů, tím menší bude uhlíková stopa.

Obrázek 17 Porovnání emitovaných emisí během celého životního cyklu



Přeloženo a upraveno z: [66]

5 Praktická část práce

Na předem zvolené trase byly naměřeny pomocí diagnostiky provozní parametry vybraných elektromobilů. Reálná data z jízdy, ale i nabíjení byla zaznamenána diagnostikou a exportována do nástroje MS Excel, kde byla následně zpracována a vyhodnocena. Druhá část praktické části byla věnována obecné analýze pomocí Pearsonovy korelace s cílem zjistit vzájemnou závislost jednotlivých výkonnostních parametrů.

5.1 Testované elektromobily

Měření proběhlo na automobilech Škoda Citigo IV a Škoda Enyaq iV 80 (tabulka 3). V tabulce uvedená vozidla nemohou využít plný výkon (22 kW) AC nabíječek, protože jsou omezeny výkonem palubní nabíječky, přes kterou prochází střídavý proud.

Tabulka 3 Vybraná vozidla

| Parametry | Jednotky | Typ vozidla | |
|------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|
| | | Škoda Citigo IV | Škoda Enyaq iV 80 |
| Kapacita baterie | [%] | 36,8 | 82 |
| Využitelná kapacita | [%] | 32,3 | 77 |
| Dojezd dle WLTP | [km] | 257 | 529 |
| Spotřeba dle WLTP | [kWh/100 km] | 14,8 | 16,3 |
| Výkon motoru | [kW] | 61 | 150 |
| Točivý moment | [Nm] | 212 | 310 |
| Zrychlení 0 - 100 km/h | [s] | 12,3 | 8,7 |
| Koeficient odporu | [-] | 0,325 | 0,234 |
| Pohotovostní hmotnost | [kg] | 1 235 | 2 010 |
| Výkon palubní nabíječky (AC) | [kW] | 7 | 11 |
| Max. dobíjecí DC výkon | [kW] | 40 | 135 |
| Rok výroby | | 2020 | 2021 |
| Počet najetých kilometrů | [km] | 42 000 | 54 000 |
| Pořizovací cena od | Kč | 499 999 | 1 254 900 |

Zdroj: Vlastní zpracování z využitých podkladů: [29, 41, 67]

Škoda Citigo iV byl vybrán z důvodu, že se jednalo o cenově dostupnější vozidlo z hlediska nákupu do roku 2021. Citigo iV se již však neprodává. Škoda Enyaq iV 80 představuje zástupce dražších automobilů.

Vozy umožňují jízdu pouze na jeden pedál. Brzdí se pomocí rekuperace – elektromotoru, který funguje jako generátor a vyrábí elektrickou energii. Ve chvíli, kdy řidič sundá nohu z pedálu, tak automobil začne přibrzďovat. Mechanické brzdy se aktivují pouze při prudkém brzdění. Sílu rekuperace si lze volit mezi třemi stupni.

Vůz Škoda Enyaq umožňuje navíc oproti Škoda Citigo automatickou volbu rekuperace. V dané výbavě obsahoval Enyaq také asistent rozpoznávání značek. Při vyšších rychlostech tak po sundání nohy z plynového pedálu vůz „plachtí“ – není přibrzďován. V okamžiku, při kterém se automobil blíží ke značce značící změnu rychlostního limitu, radar ji zaznamená, porovná s mapovými podklady a nastaví takovou úroveň rekuperace, aby při vjezdu např. do obce měl správnou rychlost.

5.1.1 Škoda Citigo iV

Vůz značky Škoda zažil svoji premiéru v roce 2019. Kromě elektrického Favoritu se jednalo o první pořádný elektromobil této firmy. Benzínový stejný model se prodával od roku 2011, ale jeho produkce byla ukončena nástupem jeho elektrického modelu. Cena podobně vybavené benzínové verze byla zhruba o 140 000 Kč levnější. Automobil podporuje pouze nabíjení o maximálním výkonu 40 kW na DC stanici. [68]

5.1.1.1 Škoda Enyaq iV 80

Enyaq se prodává ve s menší 62 kWh baterií a s větší 82 kWh. Prostorný rodinný vůz s prvky Simply Clever řešení. Automobil ve verzi 4x4 obsahuje 2 elektromotory (synchronní elektromotor s permanentními magnety na zadní nápravě a asynchronní na přední nápravě. To umožňuje využít vyšší výkon indukčního (asynchronního) motoru, když je požadována rychlá akcelerace, a naopak využívat více výkonu od synchronního motoru při klidné jízdě pro delší dojezd, protože pracuje efektivněji. Elektromobil se může dobíjet výkonem 135 kW při využití DC nabíjecího stojanu. Na obrázku 18 je zaznamenán vůz před vypůjčením od společnosti HoppyGo.

Obrázek 18 Škoda Enyaq iV 80



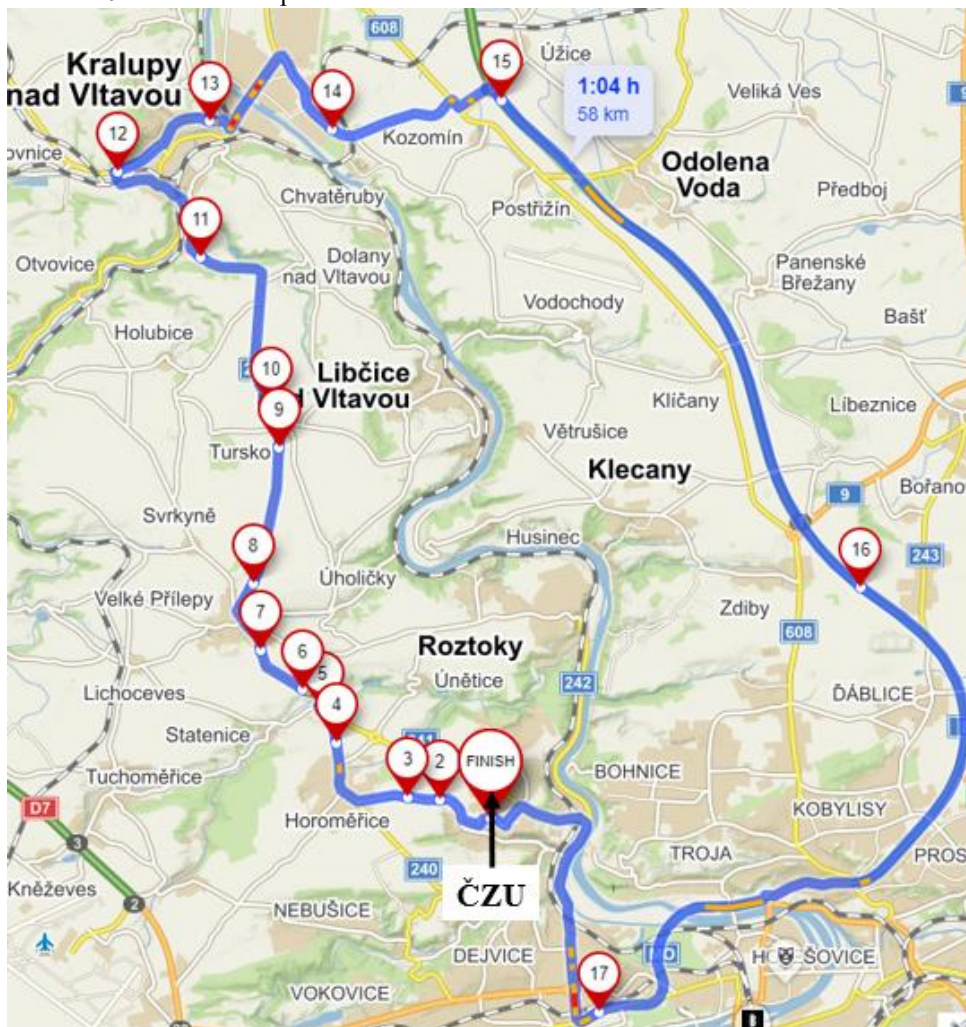
Zdroj: Vlastní

5.2 Trasa pro měření

Vybraná trasa na obrázku 19 je kombinací městského provozu s maximální rychlostí do 50 km/h, mimoměstského provozu s rychlostí do 90 km/h a s dálniční rychlostí do 130 km/h. To umožní porovnat spotřebu a množství rekuperace v těchto jednotlivých rychlostních úsecích. Celý okruh měří dohromady 58 km. Trasa startuje u technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze, dále pokračuje do Horoměřic, Kralupy nad Vltavou a přes dálnici D8 zpět do Dejvic se zakončením u technické fakulty. Druhá trasa vede pouze opačným směrem. Trasa byla projeta defenzivním způsobem s plynulými rozjezdy a brzděním. Pokud to provoz dovolil, byla snaha se držet maximální povolené rychlosti.

Jednotlivé body na mapě představují změnu rychlostního omezení. Pouze body 12 a 13 jsou pomocné pro udržení správné trasy.

Obrázek 19 Zvolená trasa pro měření



Zdroj: [71]

V tabulce 4 je zobrazeno rozdělení trasy (58 km) dle jednotlivých rychlostních limitů.

Tabulka 4 Rozdělení trasy

| Rychlostní limit [km/h] | Počet km trasy | % z celkové trasy |
|-------------------------|----------------|-------------------|
| 50 | 21,59 | 37,19 % |
| 90 | 25,27 | 43,52 % |
| 130 | 11,20 | 19,29 % |

Zdroj: Vlastní zpracování z GPS souřadnic pomocí mapy.cz

5.3 Diagnostické nástroje

Pro měření provozních parametrů byly využity diagnostika VAG-COM s jeho měřicí programem VCDS a diagnostika TEXA s programem TEXA APP. (obrázek 20 a 21). VAG-COM diagnostikuje pouze vozy koncernu Volkswagen. Touto diagnostikou bylo měřeno pouze Škoda Citigo IV, protože u Škody Enyaq nedocházelo k měření proudu. Měření probíhalo pomocí kabelu HEX – V2, který je zapojen na jedné straně do diagnostické zásuvky OBD-II a na druhé straně pomocí koncovky USB do počítače.

Měření probíhalo ve dnech 3.3. (Škoda Citigo) a 17.3. 2022 (Škoda Enyaq) mezi 13:00 – 16:00 s teplotami v rozmezí od 8° - 14° C.

Obrázek 20 Rozhraní diagnostického programu VCDS při nabíjení Citigo IV



Zdroj: Vlastní

Diagnostika Texa (obrázek 21) funguje na podobném principu, pouze komunikace mezi rozhraním OBD-II a počítačem probíhá pomocí Bluetooth. Tato diagnostika je však univerzální, což má své výhody a nevýhody. Touto diagnostikou byl tedy měřen Enyaq.

Obě dvě diagnostiky umožňují zobrazení reálných dat a jejich zápis do souboru. Neumožňují však zaznamenávání polohy. Druhým využitým měřicím zařízením byla GPS Garmin, která snímala aktuální polohu vozidla včetně jeho rychlosti. GPS snímá frekvencí jednou za sekundu, diagnostiky však vícekrát. Z toho důvodu bylo nutné oba dva získané soubory vzájemně zkompileovat pro výpočet spotřeby vozidla v jednotlivých úsecích okruhu.

Obrázek 21 Rozhraní programu Texa – data z Enyaq iV 80 během stání

| | |
|------------------------------|----------------|
| Rychlost vozidla | 0 km/h |
| | 0 0 |
| Stav nabití baterie | 91.60 % |
| | 91.60 92.80 |
| Napětí zdroje energie | 13.70 V |
| | 13.60 13.70 |
| Napětí VN baterie | 394.75 V |
| | 383.50 399.75 |
| Proud vysokonapěťové baterie | -1.48 A |
| | -209.76 125.48 |

Zdroj: Vlastní

5.4 Měření parametrů při nabíjení

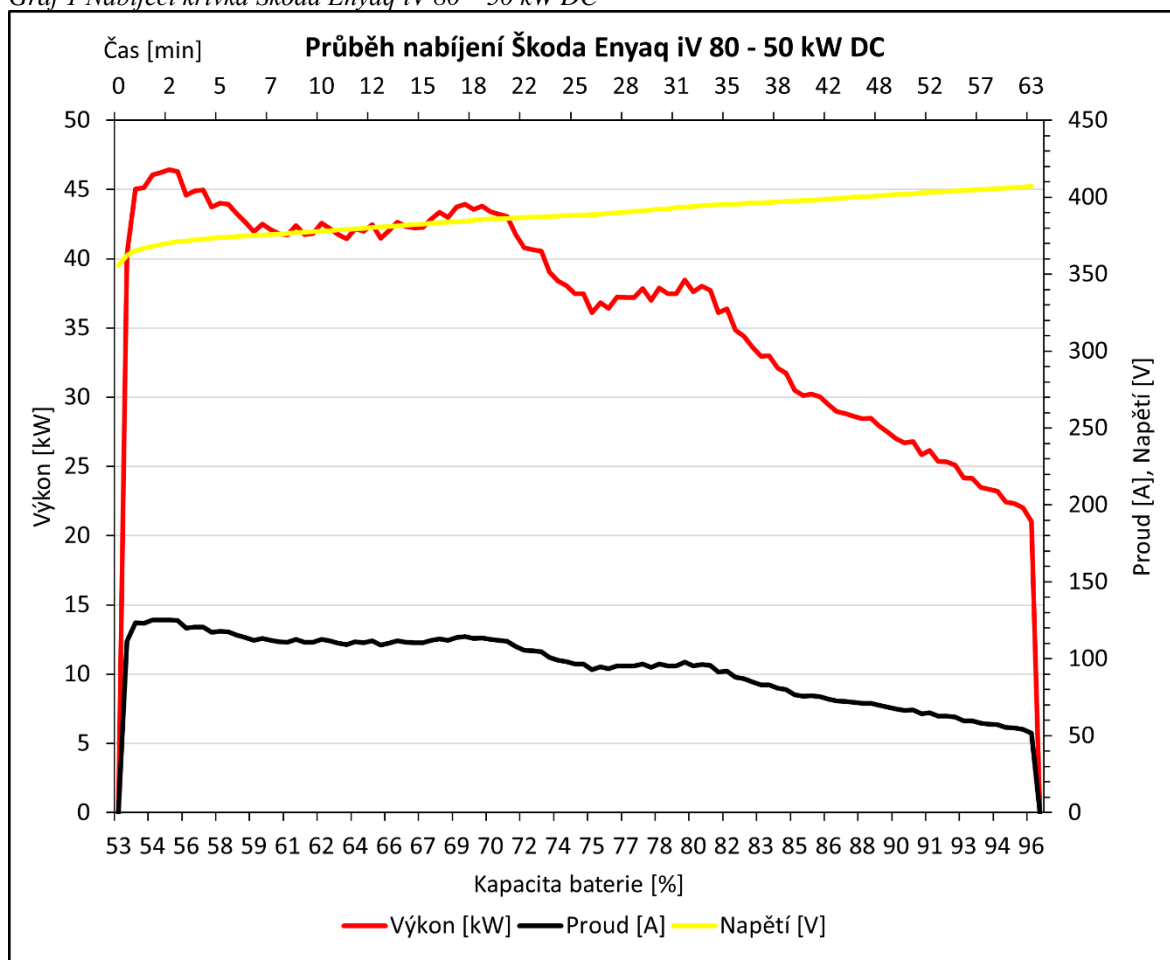
Nabíjení automobilů Škoda Citigo iV a Škoda Enyaq iV 80 probíhalo v rozmezí 11 °C – 13 °C na nabíjecí stanici o výkonu 50 kW. Maximální nabíjecí výkon Citigo iV je však pouze 40 kW.

5.4.1 Nabíjení Škoda Enyaq iV 80.

Enyaq byl připojen na nabíječku s 52,8 % baterie a napětím akumulátoru o hodnotě 355,75 V (graf 1). Maximální nabíjecí proud dosáhl hodnoty 123 A s celkovým maximálním výkonem nabíječky 46 kW. Trakční baterie si do 22 minuty udržela příjem proudu okolo 110 A s nabíjecím výkonem 42 kW. Poté nastal první znatelný pokles. Druhý strmější pokles nabíjecího výkonu nastal v 35 minutě s úrovní nabití 80 % a poklesem nabíjecího proudu pod 95 A. Akumulátor má v tuto chvíli napětí 394 V. Automobil ukončuje nabíjení při napětí 407 V, proudu 51,7 A a posledního naměřeného výkonu 21 kW.

Nabíjecí stanice odeslala 37 kWh, elektromobil přijmul 36,489 kWh. To znamená, že 0,511 kWh (1,38 %) činí ztráty.

Graf 1 Nabíjecí křivka Škoda Enyaq iV 80 – 50 kW DC



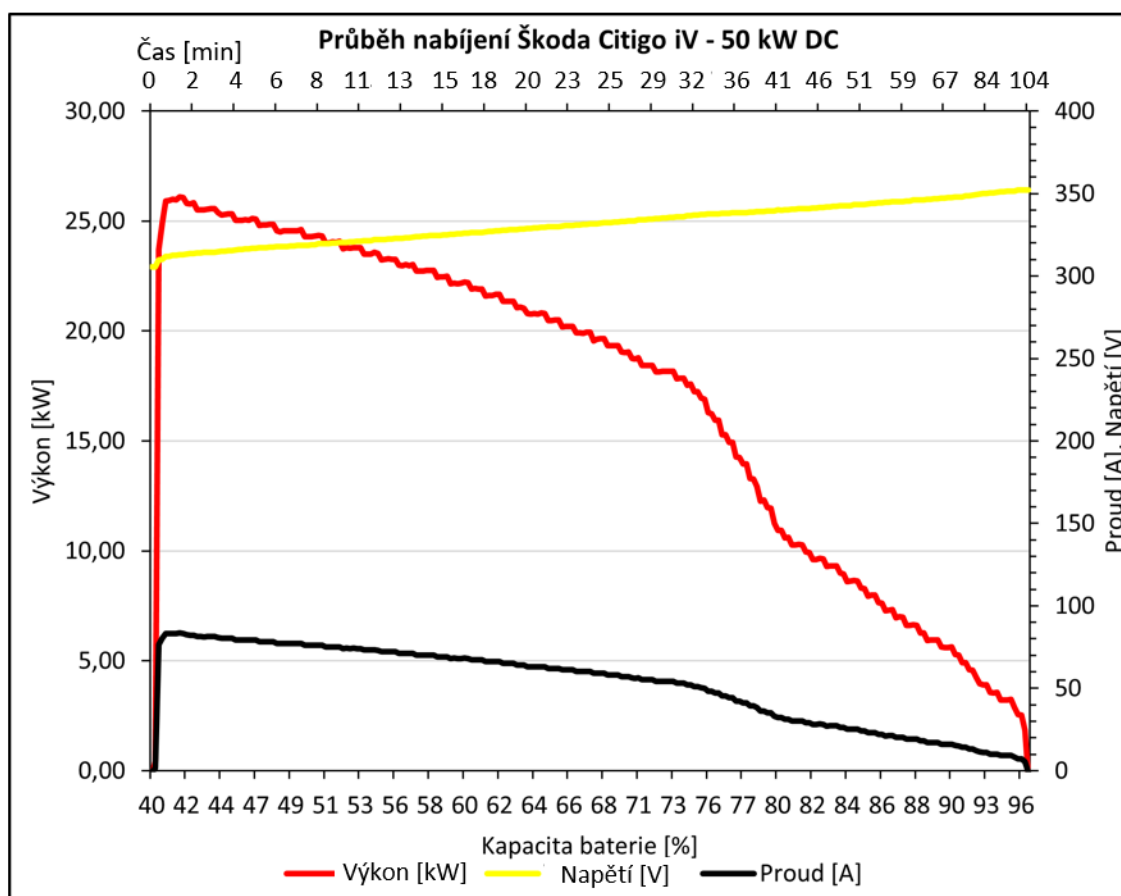
Zdroj: Vlastní zpracování z naměřených dat

Palubní počítač Enyaqu v době ukončení nabíjení ukazoval 100 %, stejnou hodnotu zobrazoval i nabíjecí stojan. Diagnostika však ukázala „pouhých“ 96 %. Po další diagnostice bylo zjištěno, že maximální využitelná kapacita akumulátoru je 74,450 kWh (77 kWh je využitelná kapacita nové baterie. Z těchto dvou hodnot tedy vychází, že Enyaq za 10 měsíců provozu a 54 000 najetých km ztratil 3,3 % kapacity baterie neboli 18 km ze svého dojezdu podle WLTP.

5.4.2 Nabíjení Škoda Citigo iV

Baterie elektromobilu v době připojení k nabíjecí stanici byla nabita z 40,2 % s 305,5 V. Proud, který začal proudit do akumulátoru dosáhl maximální hodnoty 83, 12 A. Přesto, že automobil podporuje až 40 kW nabíjecího výkonu, zde byl naměřen výkon maximálně 26 kW. Po 32 minutách razantně poklesl dodávaný výkon z 17 kW na 10,6 kW za pouhých 10 minut. Proud ve 42 minutě byl tedy 31,18 A a napětí 340 V.

Graf 2 Nabíjecí křivka Škoda Citigo iV – 50 kW DC



Zdroj: Vlastní zpracování z naměřených dat

Od 80 % kapacity baterie trvá akumulátor dobít do 100 % dlouhých 62 minut, Vzhledem k tomu, že se automobil dobil ze 40 % na 80 % za 42 minut, nedává vůbec žádný smysl tento elektromobil nabíjet na „rychlónabíječe“ nad 80 %, pokud řidič spěchá. Nabíjení je ukončeno při 96 %, které signalizovala diagnostika. Automobil a dobíjecí stojan zobrazoval 100 %. Hodnoty, při kterých došlo k ukončení jsou následující: Proud (5,63 A, Napětí 352 V, Výkon 1,85 kW)

Dobíjecí stanice dodala energii o hodnotě 20,29 kWh a elektromobil přijmul 19,67 kWh. Ztráty tedy činí 0,62 kWh (3,06 %).

5.4.3 Vyhodnocení nabíjení

U vozidla Škoda Enyaq došlo k poklesu výkonu nabíjení od startu do 80 % stavu nabití baterie o 18 %. Citigu iV poklesl dobíjecí výkon o 60,7 % při stejném 80 % stavu dobítí. Je to tím, protože u Citiga došlo k razantnímu poklesu výkonu již při 76 % nabití – dříve tedy než u vozu Enyaq Citigo se vyznačuje 2,6x většími ztrátami při nabíjení.

5.5 Měření parametrů během jízdy

Měření s Citigo iV probíhalo při teplotách okolo 8 °C a s Enyaqem okolo 13 °C. Citigo před započítáním cesty poukazovalo dojezd 249 km s pomocí poslední průměrné spotřeby 12,4 kWh/100 km. Oproti tomu Enyaq s průměrnou spotřebou 21 kWh/100 km značil dojezd pouhých 359 km. I přes nízké teploty byl intenzivní slunečný den, který vytvořil příjemnou teplotu uvnitř vozidla a klimatizace/topení bylo používáno během cesty velice zřídka a pouze nárazově. Lze jinak předpokládat, že vypočtené spotřeby by byly jinak vyšší. Enyaq byl nastaven na automatickou rekuperaci, kdy řídicí jednotka rozhoduje, zda je efektivnější po zvednutí nohy z pedálu tzv. „plachtit“ (nezpomalovat – neaktivní rekuperace) nebo naopak zpomalovat a dobíjet akumulátor. Vozidlo také reaguje na řidičovo chování – pokud vozidlo začne rekuperaci zpomalovat a řidič opětovně vyvine tlak na plynový pedál, pak automobil ukončí rekuperaci a „plachtí“. Získaná energie má kladné znaménko, odebraná záporné.

Vzhledem k tomu, že Citigo režim automatické rekuperace nenabízí a nabízí zvolení mezi třemi intenzitami rekuperace (stejně tak Enyaq). Nastavení bylo ponecháno na výchozí, při kterém Citigo po zvednutí nohy z pedálu plachtí. Energie se tak dobíjela pouze při sešlápnutí brzdového pedálu. Oba vozy měli nastavený režim provozu Normal.

V tabulce 5 jsou naměřeny hodnoty pro městský úsek (rychlost do 50 km/h), mimoměstský úsek (rychlost do 90 km/h) (tabulka 6) a dálniční úsek (rychlost do 130 km/h) (tabulka 7).

Tabulka 5 Změřené parametry – městský úsek

| Automobil | | Škoda Citigo iV | Škoda Enyaq iV 80 |
|--|--------------|-----------------|-------------------|
| Městský úsek | Jednotky | Hodnoty | |
| Délka úseku | [km] | 21,59 | 21,59 |
| Průměrná rychlost | [km/h] | 37,00 | 33,02 |
| Doba jízdy | [min] | 35,00 | 39,00 |
| Množství spotřebované energie ⁶ | [kWh] | -3,24 | -5,11 |
| Získaná energie rekuperací | [kWh] | 0,67 | 1,92 |
| Reálná spotřeba energie ⁷ | [kWh] | -2,56 | -3,19 |
| Získaná/Spotřebovaná energie | [%] | 20,68 | 37,52 |
| Průměrná spotřeba energie | [kWh/100 km] | -11,88 | -14,78 |

Zdroj: Vlastní zpracování

Enyaq, který má větší hmotnost získal větší množství energie rekuperací ve všech třech úsecích, a také jí více spotřeboval. Oba vozy měli v mimoměstském úseku nižší průměrnou spotřebu než v městském úseku. Je to způsobeno intenzivnějším dobíjením akumulátoru při zpomalování při vjezdu do obce a podíl získané energie je tak větší než v městském úseku.

Tabulka 6 Změřené parametry – mimoměstský úsek

| Automobil | | Škoda Citigo iV | Škoda Enyaq iV 80 |
|-------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|
| Mimoměstský úsek | Jednotky | Hodnoty | |
| Délka úseku | [km] | 23,27 | 23,27 |
| Průměrná rychlost | [km/h] | 58,00 | 71,00 |
| Doba jízdy | [min] | 24,00 | 20,00 |
| Množství spotřebované energie | [kWh] | -3,20 | -4,64 |
| Získaná energie rekuperací | [kWh] | 0,67 | 1,92 |
| Reálná spotřeba energie | [kWh] | -2,54 | -3,42 |
| Získaná/Spotřebovaná energie | [%] | 20,94 | 41,36 |
| Průměrná spotřeba energie | [kWh/100 km] | -10,04 | -13,54 |

Zdroj: Vlastní zpracování

⁶ Jedná se o čistou spotřebovanou energii bez započtení získané energie rekuperací.

⁷ Spotřebovaná energie minus energie získaná za pomoci rekuperace. Rekuperace tak prodlužuje dojezd.

Nejméně rekuperované energie se získalo při dálničním provozu. Provoz byl plynulý, cesta byla bez prudkých zatáček a přejezd byl proveden ve vysoké průměrné rychlosti, a tak se získalo mnohem méně energie.

Tabulka 7 Změřené parametry – dálniční úsek

| Automobil | | Škoda Citigo iV | Škoda Enyaq iV 80 |
|-------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|
| Dálniční úsek | Jednotky | Hodnoty | |
| Délka úseku | [km] | 11,20 | 11,20 |
| Průměrná rychlost | [km/h] | 112,00 | 121,00 |
| Doba jízdy | [min] | 6,00 | 5,60 |
| Množství spotřebované energie | [kWh] | -2,21 | -2,58 |
| Získaná energie rekuperací | [kWh] | 0,08 | 0,17 |
| Reálná spotřeba energie | [kWh] | -2,13 | -2,41 |
| Získaná/Spotřebovaná energie | [%] | 3,62 | 6,45 |
| Průměrná spotřeba energie | [kWh/100 km] | -19,00 | -21,55 |

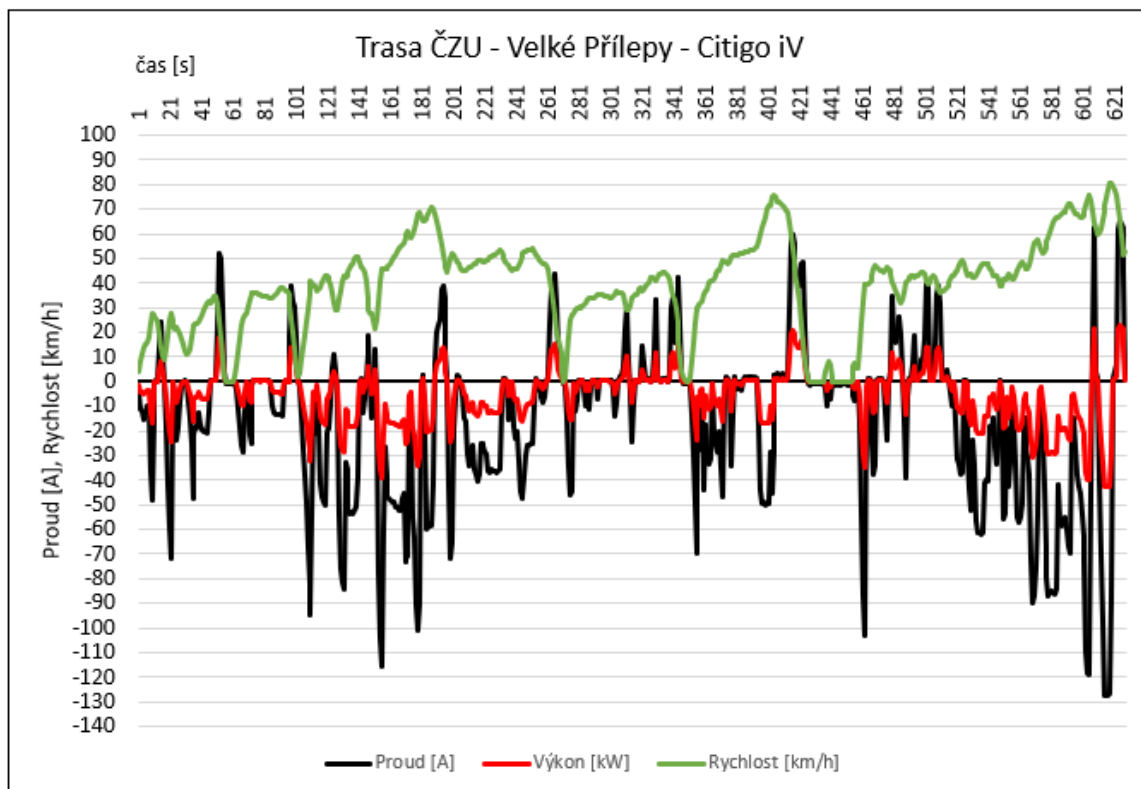
Zdroj: Vlastní zpracování

Citigo po ujetí 58 km zobrazovalo zbývající dojezd 190 km (259 na startu) a kapacita baterie poklesla z 93,6 % na 73,2 %. Dosažená průměrná spotřeba byla 13,62 kWh/100 km. Naměřená spotřeba byla menší než kombinovaná WLTP spotřeba – 14,8 kWh/100 km.

Enyaq měl zbývající dojezd 314 km (359 na startu) z 95 % na 83 %. Jeho podíl na získané/spotřebované energii byl větší a došlo k vybití menšího počtu procent než u Citigo. Naměřená spotřeba byla 16,6 kWh/100 km (WLTP – 16,3 kWh/100 km).

Na grafu 3 se nachází ukázka trasy z České zemědělské univerzity v Praze do obce Velké Přílepy automobilem Citigo. Když se nachází proud nad osou x, dochází k rekuperaci, a tedy k získávání energie. Odebíraný proud 130 A při zrychlování na 90 km/h představuje odebraný výkon 45 kW. U Škoda Enyaq iV je graf rozdílný v tom, že je dosahováno vyšších nabíjecích/vybíjecích proudů. A to až 375 A, což představuje výkon 134 kW.

Graf 3 Trasa ČZU – Velké Přílepy



Zdroj: Vlastní

5.6 Obecná analýza provozních parametrů elektromobilů

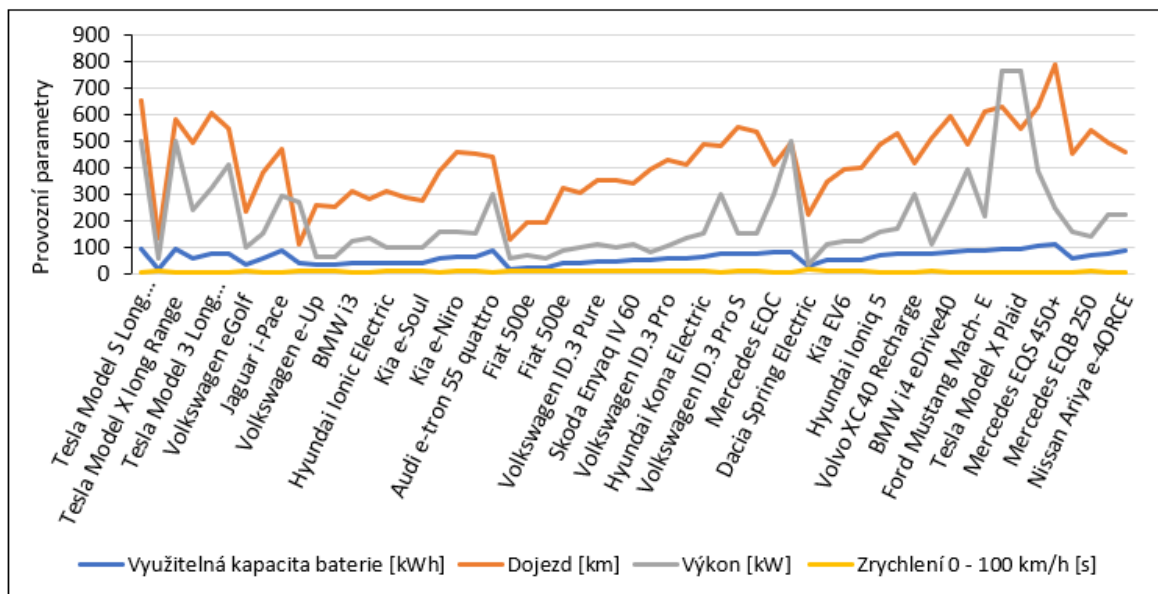
Na základě získaných provozních parametrů z [41, 72] byla vytvořena databáze nejnámějších prodávaných EV na evropském kontinentu zejména v rozmezí let 2017 – 2020 (viz příloha 3). Následně byla provedena analýza vzájemně ovlivňujících se výkonnostních parametrů pomocí Personovy korelace.

Pearsonova korelace je určena koeficientem „r“, který je mírou síly vzájemného lineárního působení mezi dvěma faktory. Korelační analýza navíc předpokládá, že korelující faktory mají normální rozdělení, což je žádoucí a představuje to vysokou statistickou významnost. Koeficient „r“ nabývá hodnot mezi -1 a 1. Přičemž číslo 1 indikuje silně

pozitivní vztah (přímá závislost dvou veličin), -1 silně negativní vztah (nepřímá závislost dvou veličin) a 0 znamená žádnou závislost. [73]

Před vlastním provedením korelační analýzy je vhodné zobrazit si trend jednotlivých provozních faktorů v lineárním grafu. Graf 3 zobrazuje trend, kde dochází ke změně výkonnostních parametrů různých značek elektromobilů. Z grafu je také patrné, že mezi danými faktory může existovat korelace.

Graf 4 Změna provozních parametrů

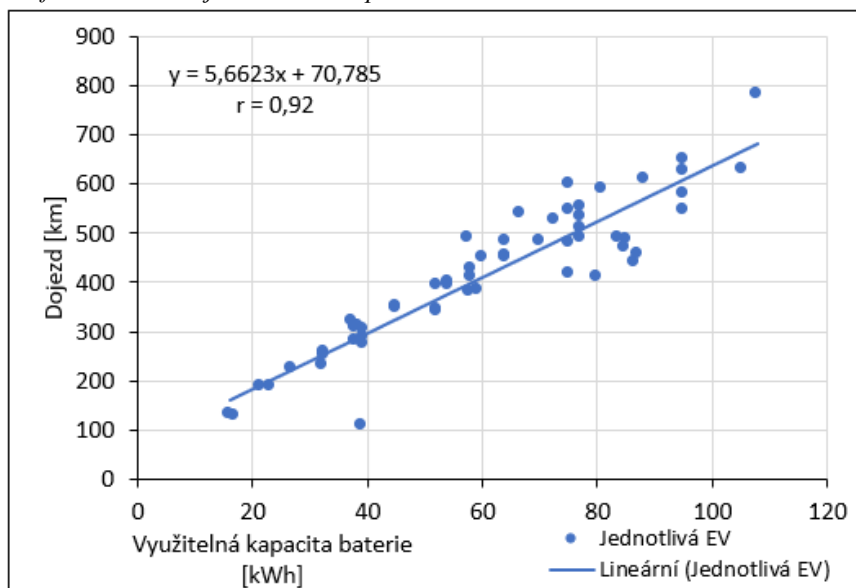


Zdroj: vlastní zpracování

Cílem této analýzy je určit, jak se vzájemně ovlivňují dané provozní parametry, nikoliv porovnání výkonu elektromobilů jednotlivých výrobců elektrovozidel.

Koeficient korelace mezi maximální dojezdem a využitelnou kapacitou baterie je 0,92. To značí silnou pozitivní vzájemnou korelaci (vzájemný vztah) mezi těmito dvěma faktory. V rovnici, která v grafu 5 představuje „y“ dojezd elektrovozidla a „x“ představuje kapacitu baterie. Pomocí této rovnice lze predikovat potřebnou kapacitu baterie pro požadovaný dojezd. Výše uvedené platí analogicky i pro ostatní lineárně závislé provozní parametry.

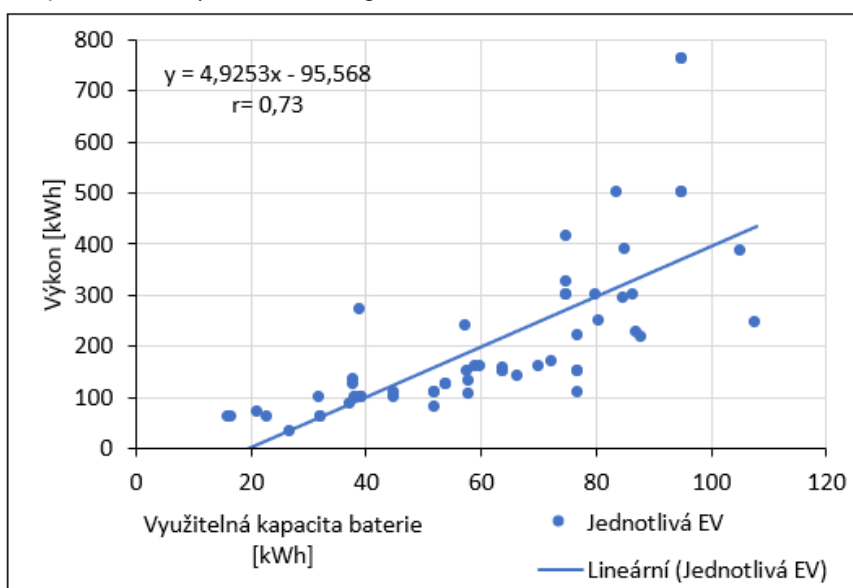
Graf 5 Závislost dojezdu EV na kapacitě baterie



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 6 představuje stále silnou pozitivní korelaci mezi výkonem EV a kapacitou baterie.

Graf 6 Závislost výkonu EV na kapacitě baterie



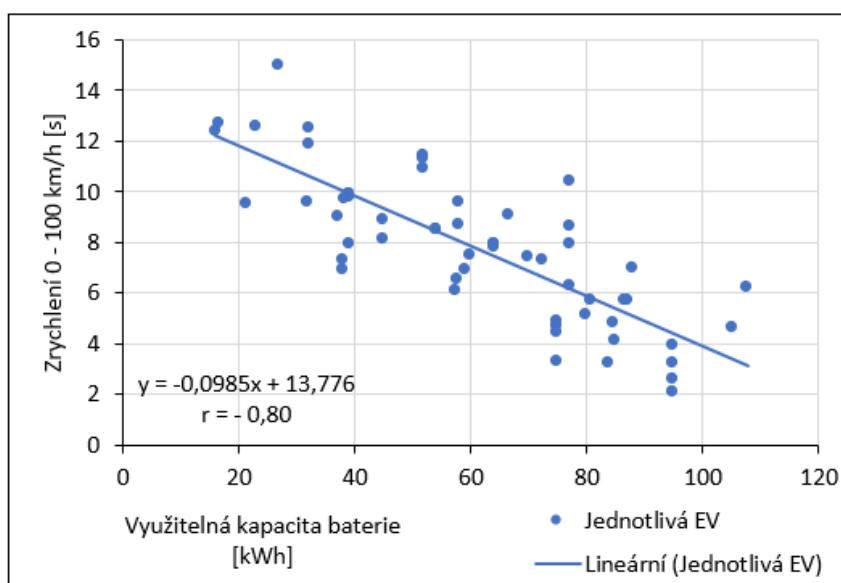
Zdroj: Vlastní zpracování

Dojezd a výkon z předcházejících grafů 5 a 6 lze chápat jako závislé proměnné, které se mění lineárně s kapacitou baterie. Lze tedy usoudit, že dojezd a výkon elektromobilu může být rozšířen zvýšením kapacity baterie.

Mezi zrychlením a kapacitou baterie je silná negativní korelace (graf 7). Zvýšením kapacity akumulátoru se sníží zrychlení daného EV. To však znamená, že se zvýšením kapacity baterie, se zvýší hmotnost vozidla. Zvýšení kapacity se totiž velice často neobejde bez přidání dalších bateriových článků, a to znamená zvýšení hmotnosti vozidla. Vyšší hmotnost pak má negativní efekt na jízdní dynamiku, brzdné charakteristiky a případně množství nákladu, které může dané vozidlo pojmout.

Kapacitu dané baterie bez zvýšení hmotnosti lze také zvýšit postupným vývojem technologie, použitím nových materiálů. [66] Tyto změny však nastávají s určitým odstupem. Například Volkswagen e-UP vyráběný v roce 2016 s využitelnou kapacitou 16 kWh o hmotnosti baterie 230 kg a stejný model v roce 2019 nabízel kapacitu 32,3 kWh s hmotností akumulátoru 248 kg. Hmotnost baterií tak představuje zhruba 20 % celkové hmotnosti vozidla. [74, 75]

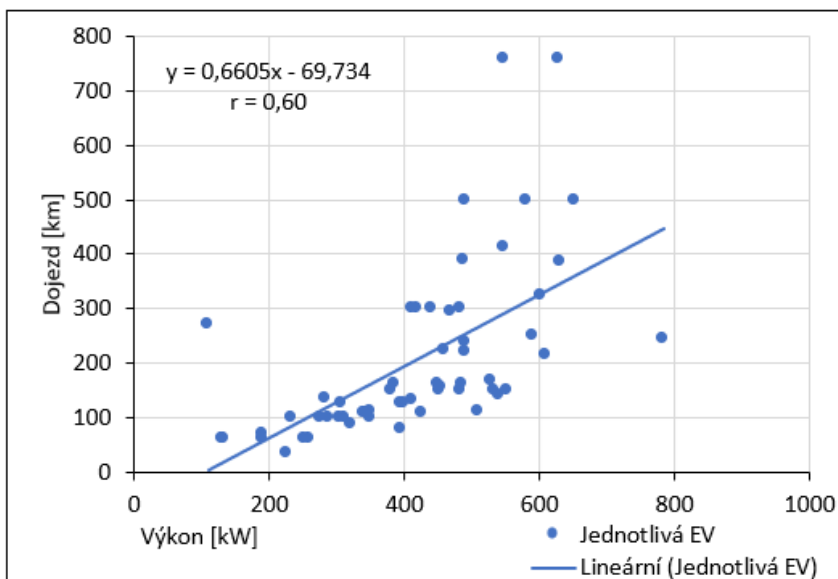
Graf 7 Závislost zrychlení EV na kapacitě baterie



Zdroj: Vlastní zpracování

U lineárního vztahu mezi výkonem a dojezdem lze nalézt poměrně stále silnou korelaci (graf 8).

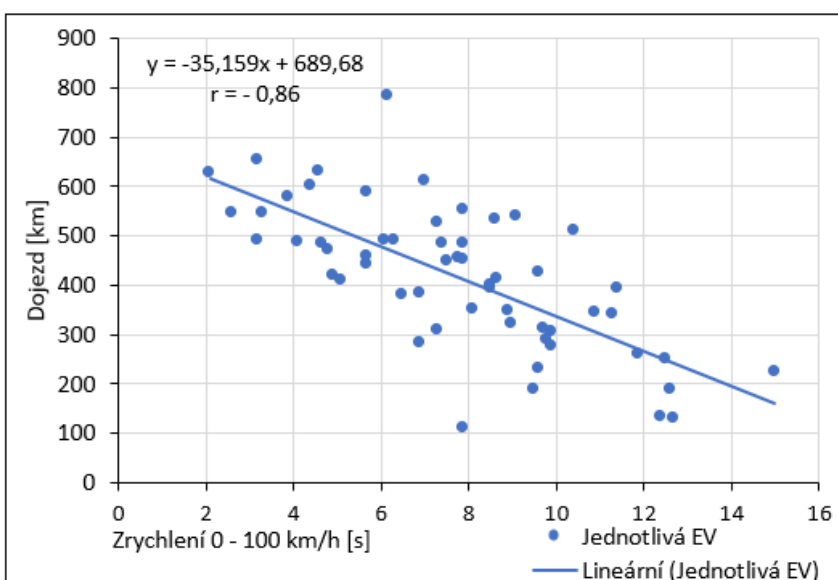
Graf 8 Vzájemný vztah výkon/dojezd EV



Zdroj: Vlastní zpracování

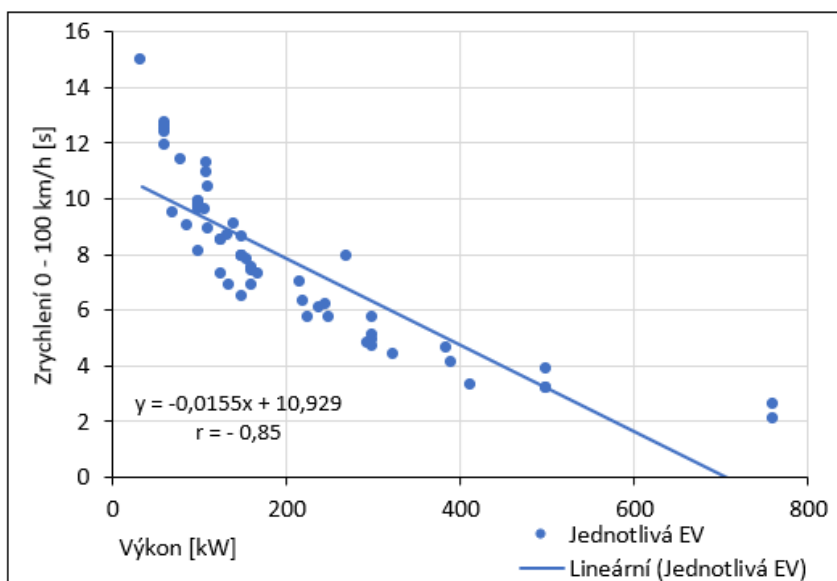
V grafu 9 a 10 je silná negativní korelace mezi parametry dojezd a zrychlení (graf 9) a mezi parametry výkon a zrychlení. (graf 10) Zvýšením dojezdu (kapacity baterie) nebo výkonu se sníží zrychlení vozidla lineárně (vozidlo akceleruje rychleji).

Graf 9 Vzájemný vztah zrychlení/dojezd EV



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 10 Vzájemný vztah výkon/zrychlení EV



Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledné vypočítané korelační koeficienty jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 8.

Tabulka 8 Korelační koeficienty

| Korelační koeficient "r" | Využitelná kapacita baterie [kWh] | Dojezd dle WLTP [km] | Maximální výkon [kW] | Zrychlení 0 - 100 km/h [s] |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Využitelná kapacita baterie [kWh] | 1,00 | | | |
| Dojezd dle WLTP [km] | 0,92 | 1,00 | | |
| Maximální výkon [kW] | 0,73 | 0,60 | 1,00 | |
| Zrychlení 0 - 100 km/h [s] | -0,80 | -0,86 | -0,85 | 1,00 |

Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledkem této korelační analýzy bylo zjištěno, že provozní parametry elektrovozidel jsou vzájemně silně ovlivněny (pozitivně nebo negativně).

6 Závěr

Elektromobily se znovu dostávají do povědomí jako součást udržitelného rozvoje společnosti s cílem přispívat k uhlíkové neutralitě a tím se nepodílet na oteplování planety. Ačkoliv elektromobily produkují více emisí a potřebují více energie při výrobě (kvůli bateriím), celkově v Evropě s evropským energetickým mixem lze říci, že výroba a provoz vozidla s elektropohonem je po 200 000 km šetrnější než se spalovacím pohonem. Další jejich výhodou představuje jednodušší pohon, který obsahuje méně součástí a je tedy méně náročný na údržbu, ale především má příznivé provozní vlastnosti.

Elektromotory umožňují využít vyšší točivý moment, který je prakticky ihned k dispozici a nachází se také v širokém spektru rychlosti, což umožňuje dynamičtější zrychlení. Celková účinnost pohonu je také vyšší. Při rekuperačním brzdění, které se podílí na dobíjení baterie během provozu, dochází k šetření brzdného obložení a třecí brzdy se zapojují až při prudkém zpomalení.

Elektrický pohon však představuje i nevýhody. Energetická hustota bateriových článků je násobně menší než kapalinových paliv. Z toho důvodu je třeba velký a těžký trakční akumulátor. Pro zachování jeho maximální životnosti se nedoporučuje baterii nabíjet na 100 % a hluboce vybíjet k 10 %. Rychlonabíjecí stanice také škodí. Výrobci dávají záruku na akumulátor 8 let a 160 000 km, akumulátor by během této periody neměl klesnout pod 70 % své kapacity. I poté však může fungovat, jen nabídne kratší dojezd. Nebo může být využit jako sekundární uložení pro energii z fotovoltaické elektrárny v rodinném domě.

Z výsledků měření jízdy na zvoleném okruhu zastupujícím městský, mimoměstský a dálniční provoz byly změřeny provozní parametry vozidel Škoda Enyaq iV 80 a Škoda Citigo iV. Obě vozidla měla největší spotřebu na dálnici, kde docházelo také k nejmenší rekuperaci vzhledem k plynulému provozu bez kongescí. Výsledná spotřeba byla téměř totožná se spotřebou dle WLTP.

Při měření nabíjení byl změřen pokles kapacity oproti novému akumulátoru o 3,3 % u Škoda Enyaq iV 80 (54 000 km, registrace 05/2021), což představuje ztrátu 18 km. Nabíjení vozu Enyaq a Citigo iV probíhalo na 50 kW nabíjecí stanici. Citigo však podporuje maximální nabíjecí výkon pouze 40 kW. Akumulátor Enyaqu se z 52,8 % procent dobíjel 35 minut proudem o výkonu 46–42 kW do 80 % kapacity akumulátoru. Zde nastal výrazný pokles dobíjecího výkonu. Zbývajících 28 minut trvalo dobít automobil do 100 %.

Škoda Citigo se však dobíjela maximálním výkonem pouhých 26 kW a znatelný pokles výkonu se vyskytl již při 77 % a dobití z 80 % na 100 % trvalo dlouhých 62 minut, a tedy výrazně déle než nabití z 40 % na 80 % (42 minut).

V závěru byla vytvořena databáze jednotlivých elektrovozidel a jejich provozních parametrů. Tyto parametry byly podrobeny Pearsonově korelační analýze s cílem zjistit, jakým způsobem jsou dané parametry vzájemně ovlivněny.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Greenhouse gas emissions from transport in Europe* — European Environment Agency [online]. [vid. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12>
- [2] KHAJEPOUR, Amir, Saber FALLAH a Avesta GOODARZI. *Electric and hybrid vehicles*. 2014. ISBN 9781118341513.
- [3] *CO₂ emission performance standards for cars and vans* [online]. [vid. 2022-03-07]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en
- [4] ALBATAYNEH, Aiman, Mohammad N. ASSAF, Dariusz ALTERMAN a Mustafa JARADAT. Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. *Environmental and Climate Technologies* [online]. 2020, **24**(1), 669–680. ISSN 22558837. Dostupné z: doi:10.2478/rtuect-2020-0041
- [5] STODOLA, Jiří, Alena BREZNICKÁ a Petr STODOLA. The influence of electromobility on the Czech automotive industry. *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies, Proceedings* [online]. 2019, 19–22. Dostupné

z: doi:10.1109/MILTECHS.2019.8870106

- [6] *Elektromobilita / Více o elektromobilitě* [online]. [vid. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/sluzby-pro-zakazniky/elektromobilita/faq/elektromobilita>
- [7] *Vysoké ceny odrazují Čechy od elektromobilů / E15.cz* [online]. [vid. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/doprava-a-logistika/vysoke-ceny-odrazuji-cechy-od-elektromobilu-1357774>
- [8] ENGE, Per, Nick ENGE a Stephen ZOEPF. *Electric Vehicle Engineering*. 2021. ISBN 978-1-26-046406-1.
- [9] *A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/features/g15378765/worth-the-watt-a-brief-history-of-the-electric-car-1830-to-present/>
- [10] *Check out the first-ever electric car designed by Porsche, the 1898 P1 / Ars Technica* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://arstechnica.com/cars/2020/02/check-out-the-first-ever-electric-car-designed-by-porsche-the-1898-p1/>
- [11] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO, Stefano LONGO a Kambiz EBRAHIMI. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2018. ISBN 978-1-4987-6177-2.
- [12] FRIVALDSKÝ, Michal, M. PRAŽENICA, R. KOŇARIK, P. ŠPÁNIK, P. ČUBOŇ, R. RADVAN a V. RÁČEK.

Elektromobilita. 2019. ISBN 978-80-554-1598-7.

- [13] *A brief history of electric cars: the most popular car of 1900 - Curbed* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://archive.curbed.com/2017/9/22/16346892/electric-car-history-fritchle>
- [14] *Inflation Calculator* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.in2013dollars.com/us/inflation/1908?amount=850>
- [15] *1914 Detroit Electric Model 47 Brougham, Personal Car of Clara Ford - The Henry Ford* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/209957/>
- [16] *TEST: BMW i3 – elektromobil pro moderní město* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/test-bmw-i3-elektromobil-pro-moderni-mesto/>
- [17] *2012 Tesla Model S Review & Ratings | Edmunds* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.edmunds.com/tesla/model-s/2012/review/>
- [18] *Tesla just made its one millionth car - The Verge* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2020/3/10/21172895/tesla-one-million-cars-production-model-y>
- [19] *How to tell if your Tesla qualifies for free Supercharging -*

- Electrek* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://electrek.co/2021/07/21/how-to-tell-if-your-tesla-qualifies-for-free-supercharging/>
- [20] *O daňové zvýhodnění zákazníci nepřijdou. Tesla má řešení* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/o-danove-zvyhodneni-zakaznici-neprijdou-tesla-ma-reseni>
- [21] *Test Škoda Citigo-e iV – Elektromobil pro masy je tady* / *fDrive.cz* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/test-skoda-citigo-e-iv-elektromobil-pro-masy-je-tady-4993>
- [22] *EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database* [online]. [vid. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.ev-volumes.com/>
- [23] DAVIS, Sam. *Managing Electric Vehicle Power* [online]. 2020. ISBN 9781468601459. Dostupné z: [doi:10.4271/9781468601459](https://doi.org/10.4271/9781468601459)
- [24] *Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work?* [online]. [vid. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [25] *Asynchronní motor a Synchronní motor - YouTube* [online]. [vid. 2022-03-12]. Dostupné

- z: <https://www.youtube.com/watch?v=-J1Km7h38U8&t=850s>
- [26] *FyzWeb - Jak funguje vysavač* [online]. [vid. 2022-03-12].
Dostupné
z: http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=90&id_casti=31
- [27] SUSLOV, Andrej. *Řízení soustavy bezkartáčových motorů*. 2014.
- [28] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. B.m.: Grada Publishing, a.s., 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [29] *EV catalog* [online]. Dostupné
z: <https://www.evspecifications.com/>
- [30] *Rotory s permanentními magnety* [online]. 2022. Dostupné
z: <https://www.pzk.cz/rotory-s-permanentnimi-magnety>
- [31] *Motor technology from Model 3 helps Tesla boost Model S range 10% | Ars Technica* [online]. [vid. 2022-03-13].
Dostupné z: <https://arstechnica.com/cars/2019/04/motor-technology-from-model-3-helps-tesla-boost-model-s-range-10/>
- [32] Enyaq [online]. 2021. Dostupné z: <https://cdn.skoda-storyboard.com/2020/08/TD-ENYAQ-iV-en.pdf>
- [33] *Palubní nabíječka elektromobilů* [online]. [vid. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/palubni-nabijecka-elektromobilu>

- [34] *AC / DC nabíjení* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/ac-dc-nabijeni>
- [35] *How Electric Vehicles Work / Electric Vehicles / SEAI* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.seai.ie/technologies/electric-vehicles/what-is-an-electric-vehicle/how-electric-vehicles-work/>
- [36] KOŠÍK, Michal a Pavel SKAROLEK. Trakční vlastnosti elektromobilu výkony a účinnosti [online]. 2017, 1–20. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/B1M14_EPT/EPT_úloha5_2017_18_elektromobil.pdf
- [37] LIVINȚ, Gheorghe, Vasile HORGA, Marcel RĂȚOI a Mihai ALBU. Control of Hybrid Electrical Vehicles. *Electric Vehicles - Modelling and Simulations* [online]. 2011 [vid. 2022-03-12]. Dostupné z: doi:10.5772/16637
- [38] *Elektromobily: Proč se obejdou bez vícestupňové převodovky? / auto.cz* [online]. [vid. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/elektromobily-proc-se-obejdou-bez-vicestepnove-prevodovky-109262>
- [39] *The Past, Present, and Future of Electric Vehicle Transmissions / Current Automotive* [online]. [vid. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.currentautomotive.com/the-past->

present-and-future-of-electric-vehicle-transmissions/

- [40] NIKOWITZ, Michael, ed. *Advanced Hybrid and Electric Vehicles* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016. Lecture Notes in Mobility. ISBN 978-3-319-26304-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-26305-2
- [41] *Range of full electric vehicles cheatsheet - EV Database* [online]. [vid. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car>
- [42] *EQS od Mercedes-EQ: výrazné prvky* [online]. [vid. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.cz/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqs/saloon-v297/explore/footnote.module.html>
- [43] UN-NOOR, Fuad, Sanjeevikumar PADMANABAN, Lucian MIHET-POPA, Mohammad Nurunnabi MOLLAH a Eklas HOSSAIN. A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies* [online]. 2017, **10**(8). ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en10081217
- [44] LIU, Jinming a Huei PENG. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* [online]. 2008, **16**(6), 1242–1251. ISSN 10636536. Dostupné z: doi:10.1109/TCST.2008.919447
- [45] Electric and hybrid vehicles. nedatováno.

- [46] *Test elektromobilu BMW i3 REX* [online]. [vid. 2022-03-20].
Dostupné z: <https://auto-mania.cz/test-elektromobilu-bmw-i3-rex/>
- [47] JAIN, Shailendra a Lalit KUMAR. Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion. *Power Electronics Handbook* [online]. 2018, 1023–1065. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811407-0.00035-0
- [48] *Toyota Prius Comfort 5dveřový / Originální hybrid*. [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/new-cars/prius/>
- [49] ALATTAR, Sufyan. *Trafficar* [online]. [vid. 2022-03-21].
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331074918_Trafficar
- [50] *Toyota Prius Plug-in Hybrid Executive 5dveřový* [online]. [vid. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/new-cars/prius-plugin/>
- [51] GRÖGER, Oliver, Hubert A. GASTEIGER a Jens-Peter SUCHSLAND. Review—Electromobility: Batteries or Fuel Cells? *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2015, **162**(14), A2605–A2622 [vid. 2022-03-24]. ISSN 0013-4651.
Dostupné z: doi:10.1149/2.0211514jes
- [52] *Začátek vodíku v Čechách! Začala stavba první veřejné stanice*

- fDrive.cz* [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/zacatek-vodiku-v-cechach-zacala-stavba-prvni-verejne-stanice-7594>
- [53] *Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science* [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>
- [54] *Ceny Li-Ion baterií pro EV klesly na \$132 za kWh, chvíli možná nebude lépe / Svět hardware* [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/ceny-li-ion-baterii-pro-ev-klesly-na-132-za-kwh-chvili-mozna-nebude-lepe/56552>
- [55] SUN, Xiaoli, Zhengguo LI, Xiaolin WANG a Chengjiang LI. Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 90 [online]. 2019, **13**(1), 90 [vid. 2022-03-23]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/EN13010090](https://doi.org/10.3390/EN13010090)
- [56] *Test Jaká je spotřeba Škody Enyaq 80 iV v běžném provozu? – Zaostřeno na spotřebu / fDrive.cz* [online]. [vid. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/test-jaka-je-spotreba-skody-nyaq-80-iv-v-beznem-provozu-zaostreno-na-spotrebu-7918>

- [57] ANSEÁN, David, Manueala GONZÁLEZ, Juan VIERA CARLOS, Juan ALVAREZ CARLOS a Cecilio BLANCO. *Electric Vehicle Li-ion Battery Evaluation based on Internal Resistance Analysis* [online]. [vid. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7007058>
- [58] *Teplota ve vývoji baterie - QuantumScape* [online]. [vid. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.quantumscape.com/resources/blog/temperature-in-battery-development/>
- [59] *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries - Battery University* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>
- [60] *BU-502: Discharging at High and Low Temperatures - Battery University* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures>
- [61] *Advanced Electric Drive Vehicle* [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www.academia.edu/42039730/Advanced_Electric_Drive_Vehicles
- [62] *Understanding Charge-Discharge Curves of Li-ion Cells* •

- EVreporter* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné
z: <https://evreporter.com/understanding-charge-discharge-curves-of-li-ion-cells/>
- [63] *18650 Battery charge algorithm process doubt. - Using Arduino / General Electronics - Arduino Forum* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné
z: <https://forum.arduino.cc/t/18650-battery-charge-algorithm-process-doubt/644432>
- [64] FALVO, Maria Carmen, Danilo SBORDONE, I Safak BAYRAM a Michael DEVETSIKIOTIS. *EV Charging Stations and Modes: International Standards* [online]. nedatováno [vid. 2022-03-21]. Dostupné
z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.728.1023&rep=rep1&type=pdf>
- [65] *CHARGING BASICS 102: Electric Vehicle Charging Levels, Modes and Types Explained | North America Vs. Europe Charging cables and plug types - E-Mobility Simplified | Basics of Electric Vehicles and Charging* [online]. [vid. 2022-03-21]. Dostupné
z: <https://www.emobilitysimplified.com/2019/10/ev-charging-levels-modes-types-explained.html>
- [66] *Auf dem Weg zur neutralen CO2-Bilanz von E-Fahrzeugen / VDI* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné

- z: <https://www.vdi.de/news/detail/co2-bilanz-von-e-fahrzeugen>
- [67] Nissan [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/cz/brochures/Techdata/Nissan_LE_AF_Tech_data_CZ.pdf
- [68] *Podle našich výpočtů se elektrická Škoda Citigo vyplatí po ujetí 100 tisíc kilometrů | Autosalon TV* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.autosalon.tv/novinky/bonusy-k-tv-poradu/podle-nasich-vypoctu-se-elektricka-skoda-citigo-vyplati-po-ujeti-100-tisic-kilometru>
- [69] *Nový 60kWh Nissan Leaf jen 120 000 Kč dražší než 40kWh verze?* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/novy-60kwh-nissan-leaf-jen-120-000-kc-drazsi-nez-40kwh-verze/>
- [70] *What is 800V Charging? The Complete Guide - Top Charger* [online]. [vid. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://topcharger.co.uk/what-is-800v-charging/>
- [71] *Mapy.cz* [online]. [vid. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.5601930&y=50.6544493&z=11>
- [72] *EVS specifications - Electric vehicle specifications, electric car news, EV comparisons* [online]. [vid. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.evspecifications.com/>

- [73] *Pearson correlation coefficient - Wikipedia* [online].
[vid. 2022-03-27]. Dostupné
z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient
- [74] *2016 Volkswagen e-up! - Specifications* [online]. [vid. 2022-03-27]. Dostupné
z: <https://www.evspecifications.com/en/model/c0467a>
- [75] *2020 Volkswagen e-up! - Specifications and price* [online].
[vid. 2022-03-27]. Dostupné
z: <https://www.evspecifications.com/en/model/baf4b4>
- [76] *Nové výpočty spotřeby dle cyklu WLTP / Opel Česká republika*
[online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné
z: <https://www.opel.cz/nastroje/wltp-jizdnhocyklu-spotrebapaliva.html>

8 Seznam obrázku

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Egger – Lohner C.2 v muzeu ve Stuttgartu | 5 |
| Obrázek 2 Detroit electric | 6 |
| Obrázek 3 GM EV1 | 7 |
| Obrázek 4 Růst prodejů elektrovozidel | 8 |
| Obrázek 5 Technologické uspořádání elektrovozidla | 9 |
| Obrázek 6 Synchronní motor | 10 |
| Obrázek 7 Rozpad elektromotoru uvnitř kola | 12 |
| Obrázek 8 Schéma elektromobilu | 13 |
| Obrázek 9 Charakteristika: točivý moment-rychlost | 15 |
| Obrázek 10 Schéma sériového hybridu při jízdním režimu | 17 |
| Obrázek 11 Schéma paralelního hybridu při jízdním režimu | 18 |
| Obrázek 12 Schéma kombinovaného hybridu při jízdním režimu | 19 |
| Obrázek 13 Srovnání jednotlivých typů baterií | 21 |
| Obrázek 14 Li-Ion NCA článek o kapacitě 2,8 Ah | 25 |
| Obrázek 15 Průběh nabíjení | 27 |
| Obrázek 16 Nabíjecí režimy | 28 |
| Obrázek 17 Porovnání emitovaných emisí během celého životního cyklu | 30 |
| Obrázek 18 Škoda Enyaq iV 80 | 33 |
| Obrázek 19 Zvolená trasa pro měření | 34 |
| Obrázek 20 Rozhraní diagnostického programu VCDS při nabíjení Citigo IV | 35 |
| Obrázek 21 Rozhraní programu Texa – data z Enyaq iV 80 během stání | 36 |
| Obrázek 22 Točivý moment – rychlost | 65 |
| Obrázek 23 Točivý moment – rychlost | 65 |

9 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Hloubka vybití a počet cyklů NMC a LiPO4 baterie | 24 |
| Tabulka 2 Závislost nabití článku na počtu vybíjejících cyklů a množství energie | 25 |
| Tabulka 3 Vybraná vozidla | 31 |
| Tabulka 4 Rozdělení trasy | 34 |
| Tabulka 5 Změřené parametry – městský úsek | 40 |
| Tabulka 6 Změřené parametry – mimoměstský úsek | 40 |
| Tabulka 7 Změřené parametry – dálniční úsek | 41 |
| Tabulka 8 Korelační koeficienty | 47 |
| Tabulka 9 Provozní parametry vybraného výběru elektromobilů | 66 |

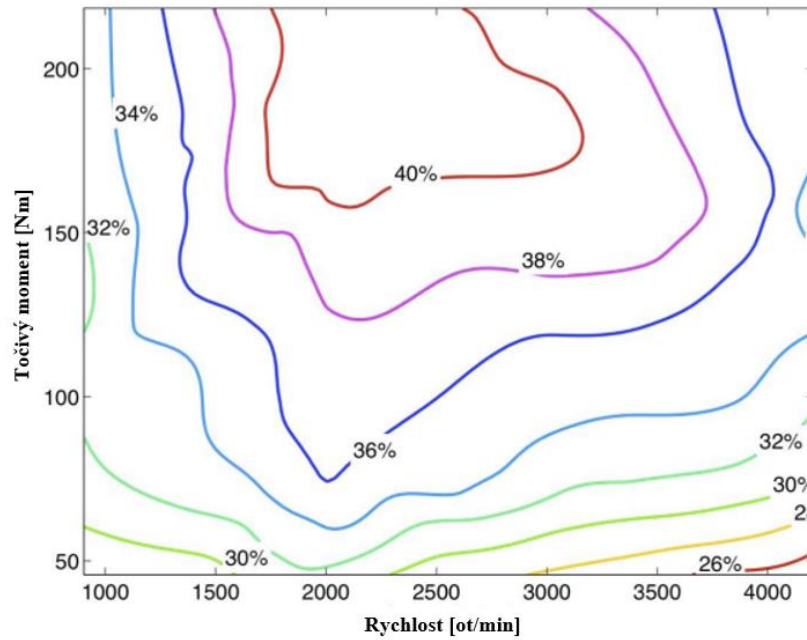
10 Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Nabíjecí křivka Škoda Enyaq iV 80 – 50 kW DC | 37 |
| Graf 2 Nabíjecí křivka Škoda Citigo iV – 50 kW DC | 38 |
| Graf 3 Trasa ČZU – Velké Přílepy | 42 |
| Graf 4 Změna provozních parametrů | 43 |
| Graf 5 Závislost dojezdu EV na kapacitě baterie | 44 |
| Graf 6 Závislost výkonu EV na kapacitě baterie | 44 |
| Graf 7 Závislost zrychlení EV na kapacitě baterie | 45 |
| Graf 8 Vzájemný vztah výkon/dojezd EV | 46 |
| Graf 9 Vzájemný vztah zrychlení/dojezd EV | 46 |
| Graf 10 Vzájemný vztah výkon/zrychlení EV | 47 |

11 Přílohy

11.1 Příloha 1 Pole účinnosti spalovacího motoru

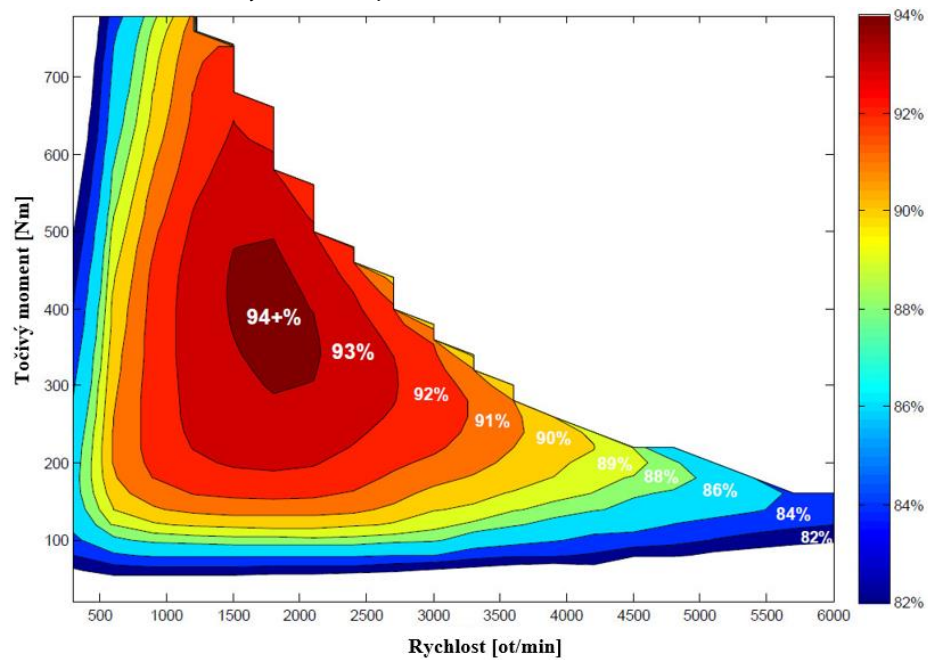
Obrázek 22 Točivý moment – rychlost



Zdroj:[4]

11.2 Příloha 2 Pole účinnosti elektromotoru

Obrázek 23 Točivý moment – rychlost



Zdroj:[4]

11.3 Příloha 3

Data v tabulce 9 byla získána z databází o elektrovozidlech. [29, 41]

Tabulka 9 Provozní parametry vybraného výběru elektromobilů

| Typ automobilu | Rok uvedení na trh | Využitelná kapacita baterie [kWh] | Dojezd dle WLTP [km] | Maximální výkon [kW] | Zrychlení 0 - 100 km/h [s] |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| Tesla Model S long Range | 2012 | 95 | 652 | 500 | 3,2 |
| Volkswagen e-Up | 2013 | 16 | 133 | 60 | 12,4 |
| Tesla Model X long Range | 2015 | 95 | 580 | 500 | 3,9 |
| Tesla Model 3 | 2016 | 57,3 | 491 | 239 | 6,1 |
| Tesla Model 3 Long Range AWD | 2016 | 75 | 602 | 324 | 4,4 |
| Tesla Model 3 AWD Performance | 2016 | 75 | 547 | 413 | 3,3 |
| Volkswagen eGolf | 2017 | 32 | 232 | 100 | 9,6 |
| Chevrolet Bolt EV | 2017 | 57,7 | 380 | 149 | 6,5 |
| Jaguar i-Pace | 2017 | 84,7 | 470 | 294 | 4,8 |
| Nissan Leaf | 2018 | 39 | 110 | 270 | 7,9 |
| Volkswagen eUp | 2019 | 32,3 | 260 | 61 | 11,9 |
| Škoda CITIGO IV | 2019 | 32,3 | 252 | 61 | 12,5 |
| BMW i3 | 2019 | 37,9 | 308 | 125 | 7,3 |
| BMW i3s | 2019 | 37,9 | 283 | 135 | 6,9 |
| Hyundai Ionic Electric | 2019 | 38,3 | 311 | 100 | 9,7 |
| Kia e-Niro | 2019 | 39,2 | 289 | 100 | 9,8 |
| Kia e-Soul | 2019 | 39,2 | 276 | 100 | 9,9 |
| Nissan Leaf e+ | 2019 | 59 | 385 | 160 | 6,9 |
| Kia e-Niro | 2019 | 64 | 455 | 155 | 7,8 |
| Kia e-Soul | 2019 | 64 | 452 | 150 | 7,9 |
| Audi e-tron 55 quattro | 2019 | 86,5 | 441 | 300 | 5,7 |
| Smart EQ forfour | 2020 | 16,7 | 130 | 60 | 12,7 |
| Fiat 500e | 2020 | 21,3 | 190 | 70 | 9,5 |
| Renault Twingo Electric | 2020 | 23 | 190 | 60 | 12,6 |
| Fiat 500e | 2020 | 37,3 | 321 | 87 | 9 |
| Hyundai Kona Electric | 2020 | 39,2 | 305 | 100 | 9,9 |
| Volkswagen ID.3 Pure | 2020 | 45 | 349 | 110 | 8,9 |
| Peugeot e-208 | 2020 | 45 | 350 | 100 | 8,1 |
| Skoda Enyaq IV 60 | 2020 | 52 | 340 | 109 | 11,3 |
| Renault Zoe ZE50 R110 | 2020 | 52 | 395 | 80 | 11,4 |

| Typ automobilu | Rok uvedení na trh | Využitelná kapacita baterie [kWh] | Dojezd dle WLTP [km] | Maximální výkon [kW] | Zrychlení 0 - 100 km/h [s] |
|------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Hyundai Kona Electric | 2020 | 64 | 484 | 150 | 7,9 |
| Polestar 2 Long range | 2020 | 75 | 483 | 300 | 4,7 |
| Volkswagen ID.3 Pro S | 2020 | 77 | 553 | 150 | 7,9 |
| Skoda Enyaq IV 80 | 2020 | 77 | 534 | 150 | 8,6 |
| Mercedes EQC | 2020 | 80 | 411 | 300 | 5,1 |
| Porsche Taycan Turbo | 2020 | 83,7 | 491 | 500 | 3,2 |
| Dacia Spring Electric | 2021 | 26,8 | 225 | 33 | 15 |
| Volkswagen ID.4 Prue | 2021 | 52 | 346 | 109 | 10,9 |
| Kia EV6 | 2021 | 54 | 394 | 125 | 8,5 |
| Hyundai Ioniq 5 | 2021 | 54 | 400 | 125 | 8,5 |
| Hyundai Ioniq 5 | 2021 | 70 | 485 | 160 | 7,4 |
| Kia EV6 long Range | 2021 | 72,5 | 528 | 168 | 7,3 |
| Volvo XC 40 Recharge | 2021 | 75 | 418 | 300 | 4,9 |
| Volkswagen ID.4 Pro | 2021 | 77 | 510 | 110 | 10,4 |
| BMW i4 eDrive40 | 2021 | 80,7 | 590 | 250 | 5,7 |
| Audi e-tron GT Quattro | 2021 | 85 | 487 | 390 | 4,1 |
| Ford Mustang Mach- E | 2021 | 88 | 610 | 216 | 7 |
| Tesla Model S Plaid | 2021 | 95 | 628 | 760 | 2,1 |
| Tesla Model X Plaid | 2021 | 95 | 547 | 760 | 2,6 |
| BMW iX xDrive50 | 2021 | 105,2 | 630 | 385 | 4,6 |
| Mercedes EQS 450+ | 2021 | 107,8 | 784 | 245 | 6,2 |
| Renault Megane E-Tech | 2022 | 60 | 450 | 160 | 7,5 |
| Mercedes EQB 250 | 2022 | 66,5 | 540 | 140 | 9,1 |
| Volkswagen ID.5 GTX | 2022 | 77 | 491 | 220 | 6,3 |
| Nissan Ariya e-4ORCE | 2022 | 87 | 459 | 225 | 5,7 |