



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

APLIKACE METODY POSUZOVÁNÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU VÝROBKU (LCA) NA OSOBNÍ VOZIDLA

APPLICATION OF THE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) METHOD TO PASSENGER CARS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristián Šándor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Kristián Šándor
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace metody posuzování životního cyklu výrobku (LCA) na osobní vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metody posuzování životního cyklu vozidel patří k postupům, které se v současné době začínají uplatňovat pro posuzování dopadů výroby, provozu a likvidace vozidel na životní prostředí a množství uvolněných emisí. Metoda však vyžaduje množství vstupních dat o využitých materiálech, která závisí na konstrukci a technologiích, které využívají jednotlivá vozidla.

Cíle diplomové práce:

Proveďte rešerši současného stavu metodik na určení životního cyklu výrobku (LCA – life cycle assessment) u vozidel pro pozemní dopravu. Upřesněte postupy výpočtu pro vybrané typy osobních vozidel s různými pohony z pohledu energetické náročnosti výroby, provozu a likvidace vozidla. Zaměřte se blíže na rozbor konstrukce a energetickou náročnost materiálů jednotlivých specifických konstrukčních celků vozidel např. akumulátorů, el. motorů, palivových článků, soustavy pro uskladnění vodík atd. Demonstrujte využití metody pro jedno konkrétní osobní vozidlo a porovnejte získaná data s daty uváděnými v odborné literatuře.

Seznam doporučené literatury:

BIEKER, Georg Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. The international Council of Clean Transportation, July, 2021.

XIAO, Yu et al. Suitability of energy sources for automotive application – A review. Applied Energy, 271 (2020), DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115169.

KOČÍ, Vladimír. Environmentální dopady: posuzování životního cyklu. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-858-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Elektrifikácia osobnej dopravy je v roku 2023 veľmi aktuálna a intenzívne diskutovaná téma. Aj to bolo dôvodom pre spracovanie tejto diplomovej práce s cieľom porovnať energetickú náročnosť života vozidla so spaľovacím motorom, batériového elektromobilu a elektromobilu s palivovými článkami. Teoretická časť práce zahŕňa všeobecné predstavenie metódy posudzovania životného cyklu výrobku (LCA – life cycle assessment), ďalej kapitolu s hlavnými konštrukčnými celkami spomínaných automobilov a kapitolu pre výpočty energetickej náročnosti výroby, prevádzky a likvidácie/recyklácie týchto vozidiel. Z výsledkov z teoretickej časti práce vyplýva, že energeticky najmenej náročný je životný cyklus batériového elektromobilu, nasleduje automobil so spaľovacím motorom a nakoniec elektromobil s palivovými článkami. Praktická časť práce bola spojená s fyzickou demontážou vozidla za účelom získania materiálového zloženia komponentov automobilu so spaľovacím motorom s cieľom aplikovania LCA metódy na vozidlo Škoda Octavia III. Práca môže slúžiť ako východisko pre ďalšie štúdie a vývoj ekologickejších alternatív v oblasti osobnej dopravy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

metóda posudzovania životného cyklu, energetická náročnosť, elektromobil, spaľovací motor, palivový článok

ABSTRACT

The electrification of personal transport is an intensely discussed and relevant topic in 2023. The motivation behind this master thesis was to compare the lifetime energy consumption of vehicles equipped with internal combustion engines, battery-powered electric systems, and fuel cells. The theoretical part of this master thesis includes the introduction and explanation of the method by which a product lifecycle is assessed, known as LCA. The dissertation includes a chapter detailing the main components of automobiles, followed by a chapter which has calculations the energy consumption of production, operation, and recycling or destruction of the automobiles. The outcome of the theoretical part shows that the lifecycle of a battery-powered electric car is the least energetically costly, followed by internal combustion cars, and fuel cell cars being the most energy costly. The practical part of this master thesis involved a physical decomposition of a vehicle with an internal combustion engine with the aim of obtaining the material composition of its components and applying the LCA method on the vehicle Skoda Octavia III. The thesis sparks future research and eco-friendly alternatives in personal transportation.

KEYWORDS

life cycle assessment method, energy consumption, electric vehicle, internal combustion engine, fuel cell

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠÁNDOR, Kristián. *Aplikace metody posuzování životního cyklu výrobku (LCA) na osobní vozidla*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149405>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fišer.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Bc. Jana Fišera, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 26. mája 2023

.....

Kristián Šándor

POĎAKOVANIE

Za odborný prístup, cenné rady a venovaný čas ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Bc. Janovi Fišerovi, Ph.D., za pomoc pri spracovaní praktickej časti práce ďakujem Ing. Ondřejovi Pechovi Ph.D., Ing. Patrikovi Bouchalovi a Ing. Marekovi Carbolovi a v neposlednom rade ďakujem rodine a partnerke Kristíne za podporu počas štúdia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 POSUDZOVANIE ŽIVOTNÉHO CYKLU VÝROBKU	12
1.1 Metóda LCA	12
1.2 História metódy	13
1.3 Hlavné fázy analýzy	13
1.3.1 Definícia cieľov a rozsahu.....	14
1.3.2 Inventarizácia produktového systému.....	14
1.3.3 Hodnotenie vplyvov.....	14
1.3.4 Interpretácia	15
1.4 Indikátor a charakterizačný model kategórie vplyvu	15
1.5 Metodiky posudzovania environmentálnych vplyvov	15
1.5.1 CML	16
1.5.2 TRACI	16
1.5.3 EDIP.....	16
1.5.4 Eco-indicator 99	16
1.5.5 EPS 2000.....	17
1.5.6 Ekofaktor.....	17
1.5.7 IMPACT 2002+	17
1.5.8 ReCiPe.....	17
1.5.9 EF v3.0.....	17
2 ROZBOR KONŠTRUKCIE	19
2.1 Automobily so spaľovacím motorom.....	20
2.1.1 Spaľovací motor.....	20
2.1.2 Prevodovka	22
2.2 Batériový elektromobil.....	22
2.2.1 Elektromotor.....	23
2.2.2 Akumulátor.....	25
2.3 Elektromobily s palivovými článkami.....	26
2.3.1 Palivový článok	27
2.3.2 Sústava pre skladovanie vodíka	28
3 ENERGETICKÁ NÁROČNOSŤ FÁZ AUTOMOBILU.....	29
3.1 Výroba komponentov a produkcia vozidla (A1-A5).....	32
3.2 Prevádzka vozidla (B1-B5).....	35
3.3 Koniec životnosti (C1-C4)	38
3.4 Porovnanie pohonov	40
4 APLIKÁCIA LCA ANALÝZY	43
4.1 Definícia cieľov a rozsahu	43
4.1.1 Cieľ.....	44
4.1.2 Rozsah.....	44
4.1.3 Voľba kategórií dopadu.....	45
4.2 Inventarizácia životného cyklu	45
4.2.1 Modelovanie produktového systému	49
4.3 Hodnotenie vplyvov životného cyklu	50

4.4	Interpretácia životného cyklu	52
4.5	Porovnanie výsledkov	52
Záver	53
Použité informačné zdroje	55
Zoznam použitých skratiek a symbolov	63
Zoznam príloh	66

ÚVOD

Už celé desaťročia sa ľudstvo snaží zvrátiť trend zvyšovania emisií výfukových plynov vytvorených spaľovacími motormi. Dôkazom toho je zavádzanie Euro noriem Európskou úniou, kedy ako prvá vošla do platnosti norma Euro 1 v roku 1992. Automobil spĺňajúci túto normu musel obsahovať trojcestný katalyzátor s kyslíkovou sondou, tzv. lambda sondou [1]. Po troch dekádach sprísňovania požiadaviek sú výrobcovia nútení vyrábať automobily spĺňajúce normu Euro 6, ktorá vyžaduje prítomnosť množstva systémov zameraných na redukciiu emisií, napríklad zdvojeného systému selektívnej katalytickej redukcie v sériovom usporiadaní pre redukciiu emisií NO_x (v prípade vznetových motorov), alebo prítomnosť oxidačného katalyzátora v kombinácii so systémom sekundárneho vzduchu (v prípade zážihových motorov) [2]. Odpoveďou výrobcov automobilov na zavádzanie čoraz náročnejších noriem je elektrifikácia modelov, ktorá je realizovaná čiastočne (hybridné, plug-in hybridné automobily) alebo celkovo (batériové elektromobily). Ich výhodou je nulová produkcia priamych emisií počas jazdy v elektrickom režime. Súčasťou elektromobilov sú však akumulátory, v dnešnej dobe vyrábané prevažne s lítium-iónovými článkami. Pre ich výrobu je nevyhnutná ťažba nerastných surovín [3] čo vedie k vyššej ekologickej stope pri výrobe elektromobilu, ako pri výrobe automobilu so spaľovacím motorom [4]. Problematická je takisto likvidácia elektromobilov – niektoré látky z ktorých sa skladá akumulátor sú toxické a pre životné prostredie škodlivé (napríklad ťažké kovy nikel a kobalt alebo kyseliny) [5], preto sa neustále pracuje na technológii, ktorá by zlepšila likvidáciu či recykláciu použitých akumulátorov. Vzniká otázka, či výrobou, prevádzkou a následne recykláciou elektromobilov nevzniká viac emisnej záťaže na životné prostredie ako to je počas životného cyklu automobilu so spaľovacím motorom. Odpoveďou na túto otázku je metóda životného cyklu výrobku (LCA).

Cieľom tejto diplomovej práce je priblíženie k čo najkomplexnejšiemu vyjadreniu životného cyklu (najmä z pohľadu energetickej náročnosti) pre vybrané osobné automobily s rôznymi druhmi pohonov – automobil so spaľovacím motorom, batériový elektromobil a elektromobil s palivovými článkami. Hlavným zdrojom informácií sú vedecké články a štúdie, z ktorých sú brané do úvahy objektívne poznatky, ktoré sú následne aplikované pre konkrétne vozidlá, reprezentujúce jednotlivé pohony. Praktickou časťou diplomovej práce je aplikácia metódy LCA na konkrétne vozidlo a následné porovnanie získaných dát s dátami uvedenými v odbornej literatúre.

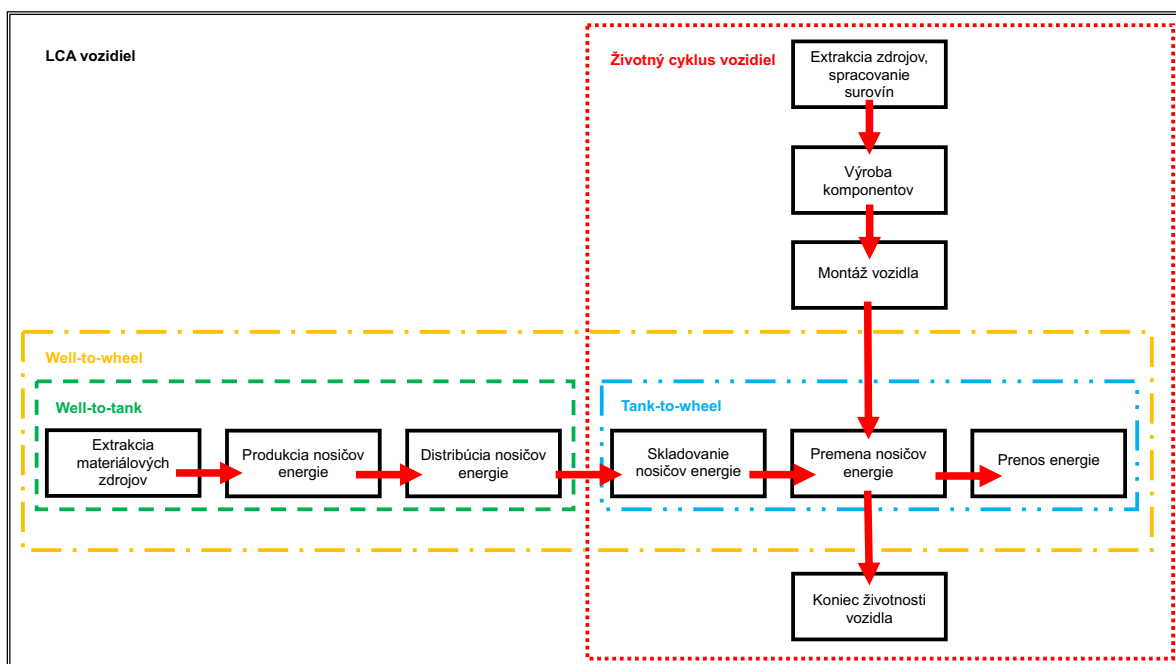
1 POSUDZOVANIE ŽIVOTNÉHO CYKLU VÝROBKU

1.1 METÓDA LCA

Posudzovanie životného cyklu, skrátene LCA (z angl. life cycle assessment) je analytická metóda hodnotenia environmentálnych vplyvov (vplyvov na životné prostredie) výrobkov, služieb, či technológií. Metóda LCA pri hodnotení vplyvov na životné prostredie zahŕňa celý životný cyklus produktu, od fázy získavania a výroby vstupných materiálov, cez fázu výroby samotného výrobku, až po fázu jeho používania a následnej likvidácie, či recyklácie materiálov obsiahnutých v konkrétnom produkte. Ide o komplexnú analýzu hodnotenia skutočných prínosov alebo záťaží, naprieč rôznymi environmentálnymi problémami, pričom je prínosná z hľadiska rozhodovania či je alebo nie je danú ekoinovatívnu techniku vhodné použiť. Pojem ekoinovácia vo všeobecnosti znamená nové postupy či techniky, minimalizujúce environmentálne vplyvy činností vznikajúce aktivitou človeka [6]. Metóda LCA je štandardizovaná v normách ČSN EN ISO 14 040 [7] a ČSN EN ISO 14 044 [8].

Podľa skúmania produktu je možné LCA štúdie rozdeliť do viacerých variantov. Tým najrozsiahlejším je „od kolísky do hrobu“ (z angl. cradle-to-grave), kedy sú hodnotené všetky fázy životného cyklu – od ťažby surovín, cez fázu používania, až po fázu likvidácie. „Od kolísky po bránu“ (z angl. cradle-to-gate) je ďalším variantom možným pre aplikáciu LCA analýzy. V tomto prípade sa jedná o čiastkové hodnotenie životného cyklu výrobku, pričom výpočty zahŕňajú fázy od ťažby surovín až po okamžik, kedy je produkt pripravený opustiť továreň, kde bol vyrobený (tzn. pred transportom k spotrebiteľovi). „Od kolísky po kolísku“ (z angl. cradle-to-cradle alebo open loop production) je výroba v otvorenej slučke, špecifický druh cradle-to-gate hodnotenia, kedy na konci životnosti produktu je proces recyklácie, pri ktorom vznikajú nové výrobky (napr. recyklácia sklenených fliaš). „Od brány k bráne“ (z angl. gate-to-gate) je čiastočná aplikácia LCA pri pohľade na konkrétnu hodnotu procesu v celom výrobnom reťazci. Spájaním gate-to-gate modelov je možné vytvoriť celkové cradle-to-gate hodnotenie [9][10].

Špecifickou podmnožinou variantu cradle-to-grave (na Obr. 1.1 vyznačené červenou farbou) je well-to-wheel analýza (preklad z angl. jazyka „od studne na kolesá“), ktorá je často rozdeľovaná do podskupín ako well-to-station, well-to-tank, tank-to-wheel alebo plug-to-wheel. Analýza well-to-wheel sa používa na posúdenie celkovej spotreby energie alebo účinnosti premeny energie a vplyvu emisií námorných plavidiel, lietadiel a motorových vozidiel, vrátane ich uhlíkovej stopy [11]. Výsledky analýzy zohľadňujú celkovú energiu a emisie potrebné na výrobu paliva použitého v dopravnom prostriedku (well-to-tank) a zároveň energiu a emisie z prevádzky. Energia a emisie spojené s výrobou a recykláciou dopravného prostriedku nie sú v analýze well-to-wheel brané do úvahy, a preto táto analýza tvorí len časť životného cyklu [12]. Obr. 1.1 predstavuje grafické znázornenie analýzy LCA pre vozidlá.



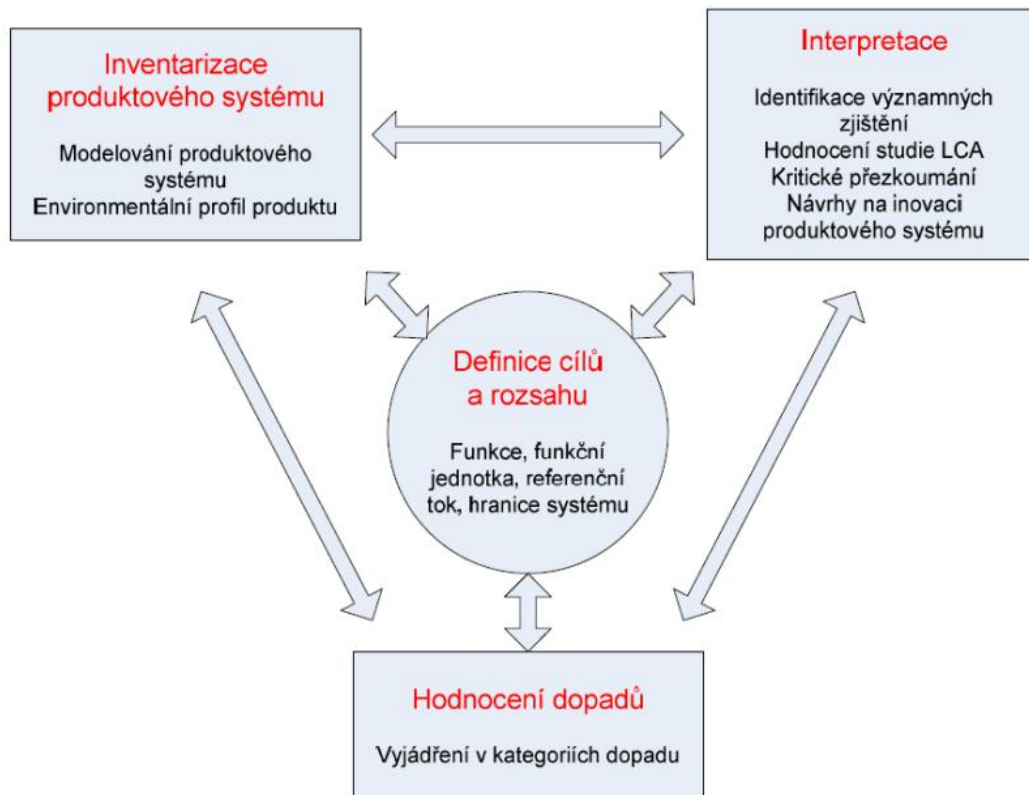
Obr. 1.1 Schéma LCA pre vozidlá a znázornenie hlavných smerov analýzy pre výrobu vozidla a transformáciu energie pre jeho pohon

1.2 HISTÓRIA METÓDY

História metódy posudzovania životného cyklu siaha do 60. rokov 20. storočia. Prvé porovnanie environmentálnych vplyvov produktov bolo realizované v Midwest Research Institute a nazývalo sa Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Prvým objednávateľom štúdie REPA sa stala firma Coca-Cola v roku 1969, ktorá sa zamerala na obalové materiály svojich produktov. V štúdii porovnávali materiály použité na obaly nápojov s inými obalmi s cieľom určiť, ktorý z nich má najmenší vplyv na životné prostredie a ako vytvoriť taký, ktorý nebude ovplyvnený obmedzeným množstvom prírodných zdrojov [13]. Trend vytvárania štúdií na životný cyklus produktov sa začiatkom 70. rokov preniesol aj do Európy. Štúdie zaoberajúce sa environmentálnymi vplyvmi produktov počas celého ich životného cyklu boli zamerané hlavne na odpadové hospodárstvo, obaly alebo na suroviny (nazývané taktiež štúdie ecobalance). Pomerne časté používanie štúdií ecobalance, viedlo koncom 80. rokov k potrebe ich formálneho ale aj obsahového zjednotenia. Názov Life Cycle Assessment sa prvýkrát vyskytol v knihe „A Technical Framework for Life Cycle Assessment“ [14], ktorá bola vydaná v roku 1991 a ako prvá definovala dodnes platné fázy LCA.

1.3 HLAVNÉ FÁZY ANALÝZY

Metóda posudzovania životného cyklu výrobku pozostáva zo štyroch hlavných fáz, ktoré sú medzi sebou vzájomne prepojené, čo znamená, že poznatky z jednej fázy môžu ovplyvniť východiská fázy predchádzajúcej, ktorú je následne potrebné prehodnotiť a pokračovať vo fáze nasledujúcej. Definícia cieľu a rozsahu, inventarizácia produktového systému, hodnotenie vplyvov a interpretácia predstavujú štyri hlavné fázy LCA metódy, pričom ich vzájomný vzťah je znázornený na obrázku Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma hlavních fází metody LCA, upravené [6]

1.3.1 DEFINÍCIA CIEĽOV A ROZSAHU

V prvotnej fáze metódy musia byť definované ciele, jasne špecifikovaný produkt a jeho funkcie. Určuje sa funkčná jednotka a referenčný tok, pričom referenčný tok predstavuje množstvo produktu, ktoré je potrebné k naplneniu funkčnej jednotky. Podrobnosť informácií obsiahnutých v štúdiu, určujú hranice systému, ktoré sa definujú v tejto časti [6].

1.3.2 INVENTARIZÁCIA PRODUKTOVÉHO SYSTÉMU

Inventarizácia životného cyklu predstavuje proces zberu a spracovania dát – získavanie informácií o energetickej a materiálovej náročnosti produktov vstupujúcich a vystupujúcich cez hranice produktového systému. Modelovanie produktového systému sa obvykle realizuje pomocou špecializovaného databázového softwaru. Ide o informácie množstva látok vypustených do životného prostredia vo forme rôznych emisií počas celého životného cyklu výrobku. Súbor takto získaných dát sa nazýva ekovektor produktu a častokrát sa prezentuje vo forme tabuľky (tzv. inventarizačná tabuľka) [6].

1.3.3 HODNOTENIE VPLYVOV

Podstatou tejto fázy analýzy je prevedenie ekovektora na hodnoty veličín jednotlivých kategórií vplyvu. To zahŕňa klasifikáciu – priradenie výsledkov z inventarizácie a charakterizáciu – vyčíslenie miery pôsobenia elementárnych tokov na jednotlivé kategórie vplyvu. Charakterizačný profil je výstupným súborom obdržaných výsledkov s konkrétnymi hodnotami a s jednoznačne definovanými jednotkami. Po charakterizácii sa často vykonáva normalizácia, čo je vzťahnutie výsledkov

z charakterizácie k referenčnej hodnote. Voliteľným prvkom hodnotenia vplyvov je váženie, vyjadrujúce významnosti kategórií vplyvov s ohľadom na ekonomicko-sociálne hľadiská [6].

1.3.4 INTERPRETÁCIA

Interpretácia životného cyklu znamená predstavenie získaných výsledkov vo forme záverečnej práce, obsahujúcej nie len popis riešenia, ale aj všetky prijaté zjednodušenia, odhady alebo predpoklady [6]. Interpretácia je delená do troch fáz – prvou je identifikácia závažných problémov, druhou je vyhodnotenie LCA štúdie a treťou fázou je špecifikácia záverov, obmedzenie a odporúčanie pre ľudí, ktorým je štúdia adresovaná [9].

1.4 INDIKÁTOR A CHARAKTERIZAČNÝ MODEL KATEGÓRIE VPLYVU

Indikátor kategórie vplyvu je merateľná veličina, slúžiaca k vyjadreniu schopnosti elementárnych tokov spôsobovať nežiadúce účinky. Na základe indikátoru je možné definovať zhoršenie danej kategórie v dôsledku ľudskej činnosti. Indikátory kategórie vplyvu sa delia do dvoch skupín – midpointové a endpointové indikátory. Midpointové indikátory predstavujú ukazovatele potenciálnej škodlivosti na základe vlastností daného elementárneho toku v zrovnaní so zvolenou referenčnou látkou. Endpointové indikátory sú merateľné (aj ekonomicky) hodnoty určitého javu, vyčísľujúce vzťah medzi elementárnym tokom a konečným prejavom na životné prostredie [6].

Charakterizačný model je definovaný postup, vyjadrujúci vplyv elementárnych tokov na konkrétnu kategóriu vplyvu. Všetky charakterizačné modely sú definované s použitím midpointových alebo endpointových indikátorov. Midpointové charakterizačné modely sú založené na meraní látok predstavujúcich elementárne toky, pričom endpointové charakterizačné modely vyčísľujú vzťah medzi elementárnym tokom a konečným prejavom poškodenia životného cyklu [6].

1.5 METODIKY POSUDZOVANIA ENVIRONMENTÁLNYCH VPLYVOV

Existuje niekoľko metodík LCIA (z angl. Life Cycle Impact Assessment), ktoré posudzujú environmentálne vplyvy vo fáze inventarizačnej analýzy - procesu zberu a spracovania dát. Každá z týchto metód predstavuje súbor charakterizačných modelov transformujúcich hodnoty elementárnych tokov na indikátory všetkých kategórií vplyvu [6]. V rámci štúdie LCA ide o najkritickejší bod, z dôvodu spracovania veľkého množstva údajov a dát zastúpených vo výsledkoch inventarizačnej analýzy. Metodiky LCIA sa vo všeobecnosti delia na metodiky midpointové a endpointové. Hlavný rozdiel medzi týmito metodikami je ten, že midpointovo orientované metodiky obmedzujú kvantitatívne modelovanie na pomerne skoré obdobie dopadového reťazca. Naproti tomu endpointové metodiky predstavujú modelovanie dopadového reťazca do konečného bodu, s čím je spojená istá miera nepresnosti [9]. Existuje dokonca kombinácia midpointovo a endpointovo orientovaných metodík [15], kedy cieľom je obdržanie výsledkov na úrovni midpointov a následné rozdelenie výsledkov do menších skupín endpointových kategórií vplyvu. Najpoužívanejšie metodiky posudzovania environmentálnych vplyvov sú vypísané v podkapitolách nižšie.

1.5.1 CML

CML je metodika založená na midpointových indikátoroch kategórií vplyvu, označovaná za najvyužívanejšiu metodiku, hlavne na území Európy [6]. Názov CML bol odvodený od miesta navrhnutia (orig. Centrum voor Milieukunde Leiden) v preklade Centrum environmentálnych vied Leiden, Holandsko. V roku 1978 na nej začal pracovať politológ so špecializáciou na ekonomiku, Gjal Huppel [16]. Prvá verzia metodiky vyšla v roku 1996 a jedná sa o najstaršiu metodiku LCIA [9]. Ako každá z metodík, aj táto obsahuje povinné a voliteľné kategórie vplyvu. Medzi tie povinné patria napríklad: vyčerpanie abiotických faktorov¹, zmena klímy, humánna toxicita, úbytok stratosférického ozónu, sladkovodná a morská ekotoxicita, acidifikácia² a eutrofizácia³ [6][17]. Medzi nepovinné kategórie vplyvu patria napríklad: strata biodiverzity, ekotoxicita sladkovodných a morských sedimentov, vplyvy ionizujúceho žiarenia, hluk, zápach vzduchu alebo zápach vody. Do oblasti ochrany sú zahrnuté napríklad: ľudské zdravie a životné prostredie.

1.5.2 TRACI

Pre oblasť Severoamerického kontinentu je zameraná midpointová metodika s názvom TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts). Táto metodika bola pôvodne vydaná v roku 2003, pričom zachovávala súlad s už existujúcimi normami US EPA [18]. Príklad kategórií vplyvu metodiky TRACI sú: poškodzovanie ozónovej vrstvy, globálne otepľovanie, tvorba smogu, acidifikácia, eutrofizácia, ekotoxicita a vyčerpanie fosílnych palív [18]. Pre európske oblasti nie je vhodné aplikovať metodiku TRACI, vzhľadom k odlišnosti v ekosystémovom zložení regiónu [6].

1.5.3 EDIP

EDIP 97 je midpointová metodika, ktorá zahŕňa vplyvy súvisiace s emisiami využívaním zdrojov a vplyvy na pracovné prostredie [22]. Táto metodika sa na základe zjednodušenia stala základom pre zložitejšie metodiky a v dnešnej dobe sa už nevyužíva [9]. Metodika EDIP 97 bola nahradená metodikou EDIP 2003, ktorá obsahuje midpointové aj endpointové indikátory kategórie vplyvu, pričom sa zameriava na použitie rôznych charakterizačných faktorov pre rovnaké elementárne toky, avšak emitované v rôznych regiónoch [6].

1.5.4 ECO-INDICATOR 99

Metodika Eco-indicator 99 bola zverejnená v roku 2000, ako aktualizácia predchádzajúcej metodiky Eco-indicator 95 [23]. Eco-indicator 99 patrí medzi endpointové metodiky, ktoré sú v anglických textoch označované aj ako damage oriented alebo top-down - metodiky zameriavajúce sa na vyčísľovanie reálnych škôd v životnom prostredí [6]. Príklady kategórií vplyvu pre metodiku Eco-indicator 99 sú: zmena klímy, poškodzovanie ozónovej vrstvy, acidifikácia, eutrofizácia, minerálne a fosílné zdroje. Táto metodika sa zameriava na tri základné skupiny

¹ Abiotický faktor – neživé faktory v prostredí, kt. ovplyvňujú životné podmienky a možnosti pre organizmy v danom ekosystéme [19].

² Acidifikácia – okysľovanie, proces kt. spôsobuje zvýšenie kyslosti vody, pôdy alebo ovzdušia v dôsledku zvýšeného množstva kyslých látok (napr. oxid siričitý, oxid dusičitý, kyselina sírová) [20].

³ Eutrofizácia – proces obohatenia vodnej plochy (alebo jej časti) anorganickými živinami, najmä dusíkom a fosforom, čo má za následok negatívne zozelenenie vody [21].

environmentálnych dopadov: ľudské zdravie, kvalita ekosystému a úbytok surovín [23] a je primárne určená na aplikáciu pre vývoj produktu.

1.5.5 EPS 2000

Ďalšou endpointovou metodikou je EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product design), ktorá bola vyvíjaná v 90. rokoch 20. storočia Švédskym inštitútom pre environmentálny výskum za účelom identifikácie prioritných environmentálnych stratégií v produktovom dizajne, kedy je potrebné vybrať si medzi dvomi alebo viacerými alternatívnymi návrhmi. Neskôr sa metodika začala používať aj na iné účely, ako sú investície a environmentálne, sociálne a podnikové riadenie [24]. Výsledkom metodiky posudzovania vplyvu EPS sú náklady na škody spôsobené emisiami a využívaním prírodných zdrojov vyjadrené ako ELU (jednotky environmentálnej záťaže). Jedna ELU predstavuje externalitu zodpovedajúcu nákladom na environmentálnu škodu vo výške jedného eura [25].

1.5.6 EKOFAKTOR

Ekofaktor je endpointová metodika, prvýkrát publikovaná v roku 1990, vyčísľujúca tlak na životné prostredie na základe rozdielu medzi súčasnou situáciou a cieľmi stanovenými v právnych predpisoch. Kľúčovými ukazovateľmi tejto metódy sú ekofaktory, ktoré merajú vplyv emisií na životné prostredie v eko-bodoch (UBP). Metodika je zameraná na oblasť Švajčiarska, pričom môže byť použitá aj v krajinách ako Belgicko, Švédsko, Nórsko, Holandsko alebo Japonsko [26].

1.5.7 IMPACT 2002+

Metodika IMPACT 2002+ je kombinácia midpointových a endpointových kategórií vplyvu. Bola vyvinutá Švajčiarskym federálnym technologickým inštitútom, sídlacim v Lausanne [27]. Metodika predstavuje implementáciu kombinovaného prístupu, ktorý spája všetky typy výsledkov inventarizácie životného cyklu, prostredníctvom niekoľkých midpointových a endpointových kategórií. Príklady midpointových kategórií: poškodzovanie ozónovej vrstvy, ionizujúce žiarenie, s vodou spojená ekotoxická, acidifikácia a eutrofizácia, globálne otepľovanie, neobnoviteľné zdroje energie a ťažba nerastných surovín. Príklady endpointových kategórií: poškodzovanie ľudského zdravia, zmena klímy alebo poškodenie zdrojov [28].

1.5.8 ReCiPe

Ďalšou metodikou, ktorá zahŕňa hodnotenie životného cyklu na úrovni midpointov a endpointov je ReCiPe, ktorá bola predstavená v roku 2008. Skratka názvu tejto metodiky predstavuje iniciály inštitútov, ktoré boli hlavnými prispievateľmi do tohto projektu – Radboud University of Nijmegen, CML a PRé Consultants [29]. Metodika bola aktualizovaná v roku 2016, pričom tri oblasti ochrany – ľudské zdravie, kvalita ekosystému a nedostatok zdrojov boli ponechané [30]. Metodika hodnotí 18 midpointových a 3 endpointové kategórie vplyvu (ľudské zdravie, kvalitu ekosystému a nedostatok zdrojov) [9].

1.5.9 EF v3.0

Projekt uvedenia metodiky Environmental Footprint (EF) začal v roku 2013 pilotnou fázou. Cieľom EF v3.0 je znížiť vplyvy výrobkov, služieb a organizácií na životné prostredie, pričom sa zohľadňujú aktivity v celom dodávateľskom reťazci, od ťažby

surovín cez výrobu a používanie až po nakladanie s odpadom. Dosahuje sa to najmä poskytovaním podrobných požiadaviek na modelovanie environmentálnych dopadov toku materiálu/energie a toku emisií a odpadov spojených s výrobkom alebo organizáciou v priebehu celého životného cyklu. Metodika sa stále vyvíja a bude pravidelne aktualizovaná na základe výberových konaní Európskej komisie [31].

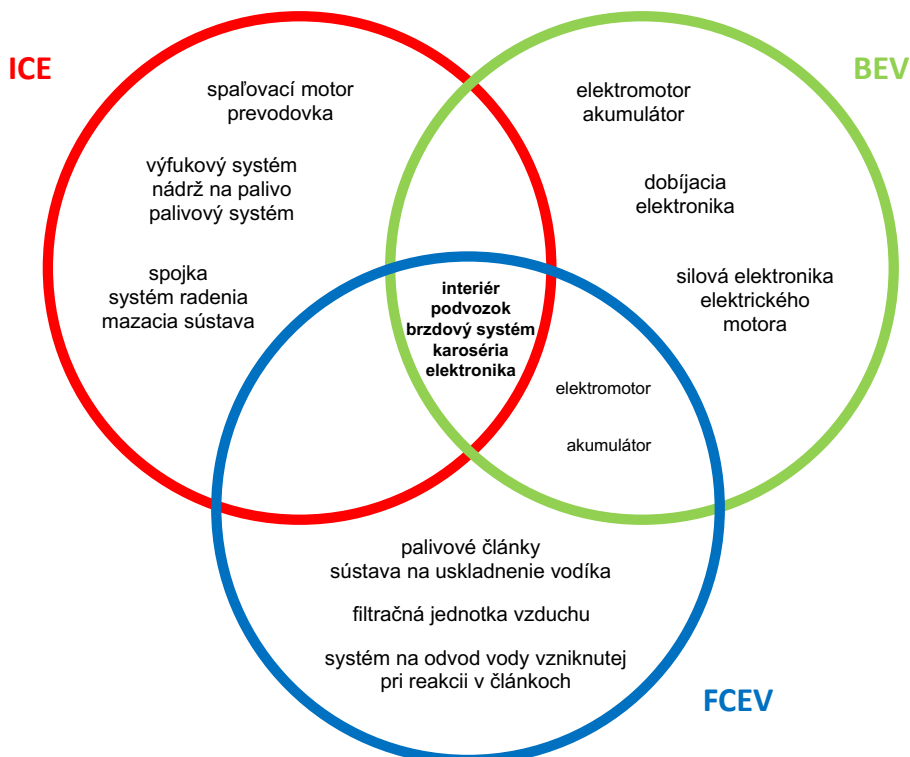
Existuje ďalšie metodiky LCIA, ktoré prikladajú dôraz na iné predpoklady, či vzťahy, pričom nie je možné určiť, ktorá metodika je lepšia alebo správnejšia. Výber metodiky zväčša závisí na požiadavkách zadávateľa štúdie, pričom vývoj jednotlivých metodík pokračuje a v budúcnosti môžu pribúdať ďalšie. Príklad ďalších metodík: JEPIX, LIME, LUCAS, BEES, IPCC, CEENE a iné.

2 ROZBOR KONŠTRUKCIE

Táto kapitola je zameraná na rozbor konštrukcie vozidiel troch rôznych pohonov – automobily so spaľovacím motorom (skratka ICE), batériové elektromobily (skratka BEV) a elektromobily s palivovými článkami (skratka FCEV).

Začiatok osobnej automobilovej éry patril elektromobilom – elektromagnetizmus vynájdený v roku 1820 [32] predurčil ich vývoj na nasledujúce desaťročia. Svoj vrchol elektromobily dosiahli na prelome 19. a 20. storočia, kedy im patrilo až 38 % z podielu amerického trhu automobilov, v porovnaní so 40 % parných strojov a len 22 % automobilov poháňaných spaľovacím motorom [33]. Obrat nastal v druhej dekáde 20. storočia kedy sa spaľovacie motory začali výrazne rozvíjať vďaka pokroku v oblasti infraštruktúry, výrobných technológií a nižšej ceny ropy. Veľkou časťou prispel k ére automobilov so spaľovacím motorom i Henry Ford so svojou pásovou výrobou Modelu T, ktorý bol v tom čase niekoľkonásobne lacnejší než elektrické automobily [34]. Približne od roku 1915 nasledovalo obdobie, ktoré patrilo automobilom so spaľovacím motorom a to až do dnešných čias, kedy sme svedkami elektrifikácie osobnej dopravy s cieľom znížiť vyprodukované emisie počas jazdy. Európsky parlament schválil novú podobu zákona, že všetky nové osobné (aj dodávkové) automobily predané v Európskej únii od roku 2035 by nemali produkovať žiadne emisie CO₂ počas prevádzky, čo v praxi znamená prechod na elektrické vozidlá [35].

Automobil je komplexný stroj, zahŕňajúci tisíce komponentov, ktoré pracujú vo vzájomnej synergii. Bez ohľadu na zdroj pohonu, všetky automobily obsahujú určité prvky, ktoré sú pre ne spoločné (viz. Obr. 2.1). Spoločný prvok môže predstavovať interiér vozidla, karoséria, brzdoý systém s kolesami, podvozok alebo elektronika vozidla. Špecifický konštrukčný celok predstavuje komponent alebo súbor komponentov, ktoré ho odlišujú od ostatných automobilov s iným pohonom. Takéto komponenty pre automobily so spaľovacím motorom sú napríklad spaľovací motor, prevodovka, výfukový systém, nádrž na palivo, palivový systém, spojka, systém radenia a mazacia sústava obsahujúca filtračný systém. Pre batériové elektromobily to je elektromotor, akumulátor, dobíjacia elektronika a silová elektronika elektrického motora. Špecifické konštrukčné celky pre elektromobily s palivovými článkami sú sústava na uskladnenie vodíka, palivové články, filtračná jednotka vzduchu a systém na odvádzanie vzniknutej vody v palivových článkoch.



Obr. 2.1 Zobrazenie prieniku konštrukčných prvkov pohonov

2.1 AUTOMOBILY SO SPALOVACÍM MOTOROM

Najkonvenčnejší konštrukčný spôsob prevedenia automobilu so spaľovacím motorom (ICE – internal combustion engine) v súčasnosti je pomocou piestového spaľovacieho motora, pracujúceho na štyri doby. Piestový spaľovací motor predstavuje akýkoľvek motor, ktorý využíva explozívne spaľovanie paliva (najčastejšie benzín alebo naftu) na posúvanie piesta vo valci (mení chemickú energiu paliva na mechanickú energiu pohybujúceho sa piestu) – priamočiarý vratný pohyb piesta otáča kľukovým hriadeľom, ktorý prenáša silu, vyvolanú pohybom piesta, ďalej cez spojku do prevodovky, rozvodovky a ďalej na kolesá.

2.1.1 SPALOVACÍ MOTOR

Spaľovací motor sa skladá z množstva komponentov, ktoré navzájom pracujú aby vytvorili potrebnú kinetickú energiu. Počet dielov motora sa líši v závislosti od jeho veľkosti, výkonu, typu spaľovaného paliva či pracovného obehu motora. Všeobecne sa dá však povedať, že menší motor, napríklad dvojtaktný zážihový motor obsahuje oveľa menej komponentov ako štvortaktný vznetový motor, pri ktorom sa počet komponentov môže pohybovať aj v tisíckach kusov [36]. Hlavnými časťami spaľovacieho motora sú: piestna skupina, ojnice, hriadele (napr. vačková, kľuková), blok motora, hlava valcov, ventily, ložiská, vstrekovací systém, mazací systém, chladiaci systém alebo výfukový systém. Nakoľko sa pri prevádzke motora dosahujú vysoké teploty a tlaky v spaľovacom priestore (10 až 12 barov pre zážihové motory, 30 až 35 barov pre vznetové motory) [37], musia byť všetky komponenty k tomu prispôbené a vyrobené z kvalitných materiálov.



Obr. 2.2 Príklad spaľovacieho motora umiestneného vo vozidle Škoda Octavia III, 1,8 TSI

BLOK VALCOV

Blok valcov je spojovacím prvkom všetkých dôležitých komponentov spaľovacieho motora. Z hornej strany blok valcov uzatvára hlava valcov a zo spodnej strany kľuková skriňa. Konštrukcia bloku pozostáva z vonkajšieho plášťa, vloženého valca a vložky valca, ktorá môže byť mokrá (v prípade vodou chladených motoroch) alebo suchá. Blok valcov sa vyrába z hliníka alebo zliatiny pomocou odlievania. V súčasnosti (z dôvodu zníženia hmotnosti a iných výhod) prevládajú bloky z hliníkových zliatin, pričom sa vyrábajú tlakovým odlievaním [38].

PIESTNA SKUPINA

Piesty v súčasných motoroch plnia viacero úloh – prenášať sily vzniknuté pri expanzii na ojnicu a kľukový hriadeľ, zaistiť zachytenie vznikajúcej normálovej sily na steny valca (v prípade prenosu tlaku na ojnicu), utesňovať spaľovací priestor voči kľukovej skrini a odvádzať teplo do chladiaceho média. Hlavné časti piesta sú: dno piesta, vodiaca časť plášťa piesta, krúžková časť (koruna piesta) a náliatok pre piestový čap (oko piesta). Piesty sú vyrábané väčšinou z hliníkových zliatin s prídavkom kremíka, tzv. silumíny (Al-Si), realizované technológiou odlievania [39].

HLAVA VALCOV

Hlava valcov uzatvára valce z hornej strany, pričom svojím tvarom vytvára požadovaný tvar spaľovacieho priestoru. Musí rýchlo odvádzať zvyškové teplo do chladiaceho média a musí odolávať vysokým tlakom pri spaľovaní zmesi. V súčasnosti sú takmer všetky hlavy valcov pre osobné vozidlá (vznetové aj zážihové motory) vyrábané z hliníka z dôvodu zníženia hmotnosti a odvodu tepla [39]. Pri výrobe hláv valcov je používaným technologickým postupom odlievanie.

OJNICA

Ojnica je komponent spájajúci piest s kľukovým hriadeľom, pričom prenáša sily z piestového čapu na kľukový hriadeľ a mení priamočiary vratný pohyb piesta na otáčavý pohyb kľukového hriadeľa. Ojnica je namáhaná na ťah, tlak a ohyb, pričom jej dĺžku určuje zdvih piesta a polomer protizávažia [39]. Prvky, z ktorých sa ojnica skladá sú: oko (umiestnenie ložiska pre piestový čap), driek, ojniové skrutky, hlava a veko ojnice. Výroba ojnice a výber materiálu vo veľkej miere závisia na parametroch motora, v ktorom bude osadená. Všeobecne sa ale môže povedať, že ojnice sa vyrábajú z ocele triedy 11 až 15, pre vysoko namáhané ojnice preplňovaných motorov sa používa aj oceľ triedy 16. Aby bol dosiahnutý dostatočne pevný a húževnatý materiál, vyrába sa výhradne zápusťkovým kovaním [40].

2.1.2 PREVODOVKA

V automobiloch sa na prenos výkonu z motora na kolesá a plynulý chod vozidla využíva prevodovka. V prípade automobilov so spaľovacím motorom sú najrozšírenejšie viacstupňové prevodovky. Ideálnu charakteristiku točivého momentu predstavuje hyperbola, čo však v praxi nie je možné dosiahnuť. Z toho dôvodu prevodovky obsahujú viacero stupňov (v osobných ICE automobiloch bežne 6 až 9), pomocou ktorých sa charakteristika točivého momentu motora priblíži k hyperbolickej ťažnej sile. Prevodovky sa delia na mechanické, automatizované a automatické. V prípade mechanických a automatizovaných prevodoviek sa zmena prevodového stupňa mení s prerušením ťažnej sily, v prípade automatických prevodoviek je to pod zaťaženie silovým stykom [39]. Najbežnejšie (pre osobné vozidlá) sú prevodovky konštruované ako ozubené kolesá s 2-hriadeľovou predlohou prevodovkou (v prípade mechanickej prevodovky). Planétové prevodovky sa vyskytujú v prípade automatických prevodoviek, ale existujú aj bezstupňové prevodovky – prevodovky s plynulo meniteľným prevodovým pomerom, takzvané variátory. Výroba prevodovky obsahuje niekoľko technologických krokov. Na začiatku je tavenie hliníkových ingot pri teplote 700 °C. Pre predstavu, ročná spotreba tohto ľahkého kovu v závode SEAT Componentes v Španielsku, kde sa vyrába prevodovka MQ200 pre koncern Volkswagen, je 15 000 ton. Následne sa roztavený hliník vstrekuje pod tlakom do foriem, výsledkom čoho je surový odliatok príslušného dielu. Nasleduje proces tepelného zušľachťovania s cieľom zlepšiť odolnosť komponentov. V tejto fáze výroby sú komponenty vystavené teplote 900 °C po dobu 14 hodín [41]. Takto zušľachtené ozubené kolesá a hriadele sa dodatočne opracujú na robotických frézoch a sústruhoch.

2.2 BATÉRIOVÝ ELEKTROMOBIL

Čoraz bežnejšími dopravnými prostriedkami sú batériové elektromobily (BEV – battery electric vehicle), ktoré sú častokrát označované ako nástupcovia automobilov so spaľovacími motormi. Dôkazom toho je počet predaných elektromobilov na svete, ktorý je podľa denníka Quartz 10,6 mil. kusov za rok 2022 [42]. Elektrické automobily (všeobecne EV – electric vehicle) v dnešnej dobe vyvíjajú a vyrábajú všetci poprední výrobcovia automobilov, pričom pojem EV zahŕňa celý rad vozidiel: BEV (battery electric vehicles) – batériové elektromobily, FCEV (fuel cell electric vehicles) – elektromobily vybavené palivovými článkami, REEV (range extender electric vehicles) – batériové elektromobily s predĺženým dojazdom, HEV (hybrid electric

vehicles) – hybridné elektromobily, PHEV (plug-in hybrid electric vehicles) – plug-in hybridné elektromobily [43].

Oproti automobilom so spaľovacím motorom sú elektromobily z pohľadu konštrukcie oveľa jednoduchšie. Napríklad elektromotor je rozmerovo menší ako spaľovací motor a je možné osadiť ho priamo na nápravu elektromobilu. V prípade pohonu všetkých štyroch kolies nie je nutný kardánový hriadeľ – namiesto toho sa na prednú a zadnú nápravu osadia nezávislé elektromotory, ktorých súčinnosť má na starosti elektronika. V prípade elektromobilov so zadným pohonom, absentuje motor v prednej časti vozidla, čo má za následok hneď niekoľko výhod – zväčšenie batožinového priestoru a najmä zväčšenie deformačnej zóny v prípade čelného nárazu. Medzi hlavné konštrukčné celky elektromobilov patria elektromotor a akumulátor.

2.2.1 ELEKTROMOTOR

Všeobecne elektrický motor je elektrický stroj, slúžiaci na premenu elektrickej energie na energiu mechanickú, ktorá predstavuje rotačný alebo lineárny pohyb, pomocou elektromagnetického javu – základným princípom elektromagnetizmu je vzájomné silové pôsobenie elektromagnetických polí vytváraných elektrickými vodičmi, ktorými preteká elektrický prúd. Každý elektrický motor obsahuje dve základné časti – rotor a stator. Rotor reprezentuje pohyblivú (väčšinou rotujúcu) časť, pričom stator je statický prvok elektromotoru [45]. Obvykle (v prípade rotačných motorov) je rotor umiestnený tak, aby magnetické polia rotora a statora vyvíjali krútiaci moment, ktorý sa následne prenáša na hriadeľ používaného stroja, čím vykonáva mechanickú prácu. Elektrické motory sa nachádzajú všade okolo nás, od techniky v domácnosti, v priemysle, stavebníctve, v strojárstve alebo v doprave.

S rastúcim záujmom o elektrifikáciu osobnej dopravy sa zrýchľuje aj vývoj elektromotorov využívaných v elektromobiloch. Na základe náročných prevádzkových režimov a pracovných podmienok v akých elektromotory v elektromobiloch pracujú, je nutné elektromotory kategorizovať do samostatnej skupiny. Rozdiel medzi elektromotormi pre EV a priemyselnými elektromotormi je v Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Porovnanie elektromotorov pre EV a priemyselných elektromotorov, upravené [43][44]

Parameter	Motory pre EV	Priemyselné motory
Teplota okolia [°C]	-40 až 140	20 až 40
Prevádzkové prostredie	nepriaznivé vonkajšie prostredie	vo vnútri budov
Teplota chladiacej kvapaliny [°C]	< 60	< 40
Teplota vinutia [°C]	160 až 200	75 až 130
Rozsah otáčok [ot/min]	0 až 15 000	< 3 000
Hladina hluku	veľmi nízka	nízka
Inštalčný priestor	veľmi obmedzený	voľný

Najčastejšie používané elektromotory pre pohon elektromobilov sú jednosmerný motor, asynchrónny motor s kotvou nakrátko a synchronný motor s permanentnými magnetmi.

JEDNOSMERNÝ KOMUTÁTOROVÝ MOTOR

Jednosmerný komutátorový motor (DC motor) je najstarší typ elektromotoru využívaného v EV. Jeho výhodou je jednoduché riadenie, pomerne jednoduchá regulácia otáčok v širokom rozsahu a schopnosť plynulého prechodu z motorickej do generátorovej prevádzky.⁴ Ďalšou výhodou je možnosť napájania motora jednosmerným napätím priamo z batérie bez použitia napäťového striedača. Jednosmerné motory delíme podľa spôsobu pripojenia budiaceho vinutia na motory s cudzím budením, sériové, derivačné a kompaundné motory [43].

ASYNCHRÓNNY MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO

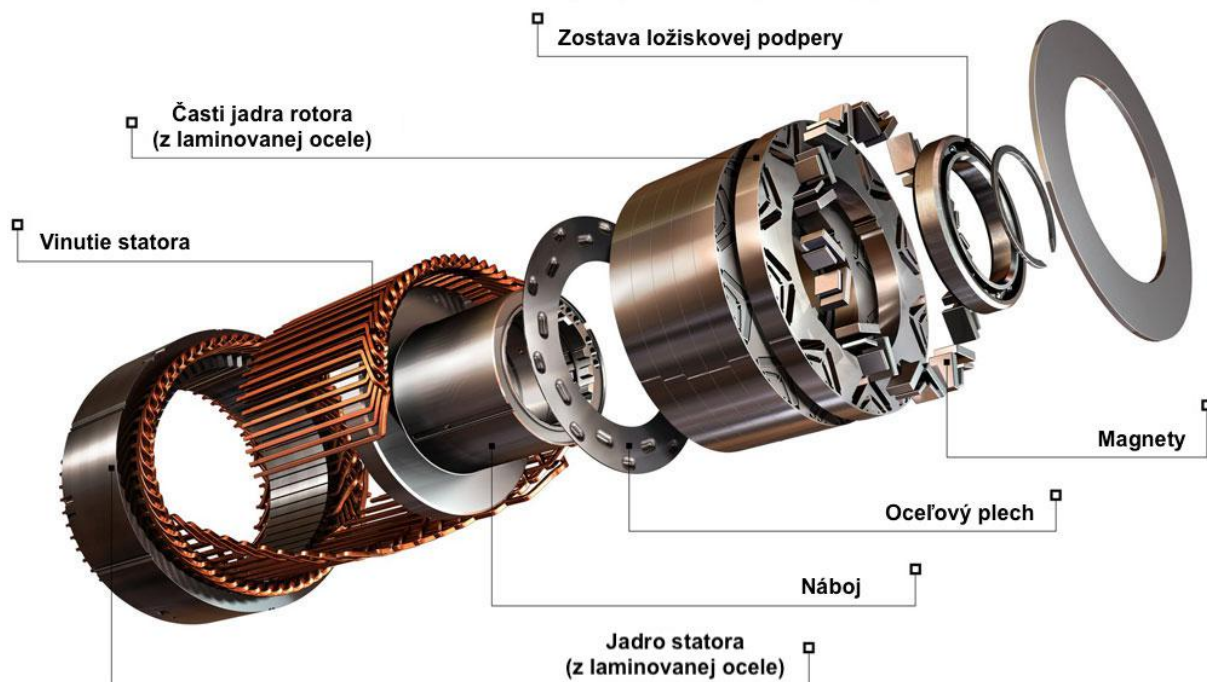
Výhodou asynchrónneho motora s kotvou nakrátko (AM motor) je jeho pomerne jednoduchá konštrukcia, možnosť vysokého preťaženia, minimálna údržba a spoľahlivosť. Asynchrónny motor je pri tom istom výkone menší a ľahší ako jednosmerný motor. Oproti jednosmernému motoru sa líši v konštrukcii, spôsobe generovania magnetického poľa a riadení rýchlosti. Elektromotory tohto typu sú používané napríklad v elektromobiloch Tesla Model S, Tesla Model X alebo Audi e-tron [43].

SYNCHRÓNNY MOTOR

PMSM (permanent magnet synchronous motor) synchrónny motor je elektromotor s permanentnými magnetmi, ktorý je najrozšírenejším synchrónnym elektromotorom v EV. V porovnaní s AM motorom má vyššiu účinnosť a menšie rozmery. Typická konštrukcia PMSM motora obsahuje trojfázové statorové vinutie, ktoré sa nachádza v drážkach, a rotor z permanentných magnetov. Na výrobu permanentných magnetov sa najčastejšie používajú zliatiny NdFeB (neodým-železo-bór) alebo SmCo (samárium-kobalt), ktorých magnetická indukčnosť je až trojnásobná v porovnaní s bežne používanými feritovými magnetmi. Elektromotory tohto typu sú používané napríklad v elektromobiloch Tesla Model 3, Nissan Leaf alebo Citroën C-Zero [43].

Vo všeobecnosti elektromotory obsahujú tieto materiály: železo – najbežnejší materiál pri výrobe magnetických jadier a rotorov, oceľ – na výrobu hriadeľov alebo ozubených kolies, magnetické zliatiny – používané pri výrobe magnetov, meď – na vinutie motora sa väčšinou používajú medené drôty ale aj iné materiály ako napríklad bór, kobalt, neodým, niób a iné [46]. Rozbor konštrukcie synchrónneho motora s permanentnými magnetmi je na Obr. 2.3.

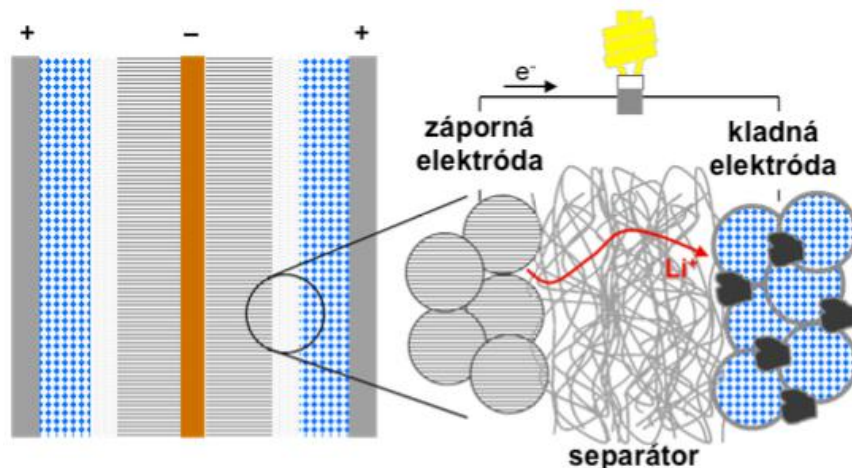
⁴ Generátorová prevádzka motora znamená premenu mechanickej energie na elektrickú energiu, napr. dynamo.



Obr. 2.3 Synchronný motor s permanentnými magnetmi v rozloženom stave, upravené [47]

2.2.2 AKUMULÁTOR

Úplne prvé náznaky batérií predstavuje Bagdadska batéria, nájdená v roku 1936 v okolí dediny Khujut Rabuah v Iraku. Tento predmet je odhadom datovaný do obdobia 248 pred n. l. až 225 n. l. Hlinená nádoba vysoká 14 cm dokázala po naplnení vínnym octom produkovať napätie 1,5 V [48]. Vynájdenie prvej novodobej batérie sa pripisuje Alessandrovi Voltovi z roku 1800. Batéria obsahovala materiály ako zinok, meď a kyselinu sírovú. Evolúcia a vývoj batérií pokračovali s vynálezmi od vedcov ako Leclanché (1. „suchá“ batéria bez elektrolytu), Gassner, Jungner (nikel-kadmiový základ) či Edison (niklovo-železný základ) [49]. Elektromobily v súčasnosti obsahujú akumulátory (možnosť dobíjania) na základe lítium-iónových batérií (skratka Li-ion), ktoré sa na trh dostali v roku 1991 spoločnosťou Sony [50]. Každý Li-ion akumulátor obsahuje články, ktoré obsahujú anódu (záporná elektróda) a katódu (kladná elektróda), ktoré delí separátor a elektrolyt. Princípom získavania energie z Li-ion akumulátorov je, že ióny lítia (Li^+) sa počas vybíjania pohybujú elektrolytom smerom od anódy ku katóde skrz separátor, pričom voľné elektróny prechádzajú vonkajším obvodom a poskytujú energiu [51], ako je to zobrazené na ilustračnom Obr. 2.4. Pri dobíjaní sa lítiové ióny a elektróny vracajú a cyklus sa opakuje. Akumulátory môžu obsahovať ľubovoľný počet článkov, pričom sú medzi sebou prepojené sériovo aj paralelne. Podľa zdroja [51], približne 33 % váhy akumulátora tvorí LiMn_2O_4 , 15 % grafit, 11 % meď, 19 % kovaný hliník a zvyšok iné materiály ako oceľ, plast alebo kompozit.



Obr. 2.4 Pohyb iónov lítia a voľných elektrónov počas vybíjania akumulátora, upravené [52]



Obr. 2.5 Výrez konštrukčného bloku akumulátora v podvozku vozidla Tesla Model Y, viditeľné jednotlivé články s označením 4680 [53]

2.3 ELEKTROMOBILY S PALIVOVÝMI ČLÁNKAMI

Ďalšou alternatívou, ktorá môže nahradiť automobily so spaľovacím motorom sú elektromobily s palivovými článkami (FCEV – fuel cell electric vehicle). Sú to v podstate elektromobily, obsahujúce nízkokapacitný akumulátor (spravidla nie viac ako 2 kWh), ktorý je dobíjaný z palivového článku, nachádzajúceho sa priamo vo vozidle. Ako je napísané v zdroji [54] „palivový článok je galvanický článok skladajúci sa z dvoch elektród (anódy nabitej záporne a katódy nabitej kladne), ktoré oddeľuje membrána alebo elektrolyt. Cez anódu je privádzaný vodík (palivo) z nádrže a cez katódu kyslík (okysličovadlo) z okolitého vzduchu, ktorý je nasávaný a dôkladne

filtrovaný od nečistôt cez prednú masku vozidla. Katalyzátor, nachádzajúci sa na anóde nám zabezpečí rozdelenie molekúl vodíka na protóny a elektróny. Pozitívne častice vodíka môžu prechádzať skrz membránu, tie negatívne naopak nie. Elektróny sú nútené použiť na pohyb ku katóde obvod, pričom je produkovaná elektrina a teplo. Po chemickej reakcii medzi elektródami vzniká ako odpadový materiál voda.“ Z pohľadu konštrukcie sú FCEV podobné BEV - palivový článok obsahuje elektródy, ktoré sú vyrábané zo vzácnych kovov ako platina, striebro, či iné kovy ako zinok, meď alebo nikel. Rozdiel v konštrukcii oproti BEV je prítomnosť sústavy pre uskladnenie vodíka, ktorý je uchovávaný priamo vo vozidle pri vysokých tlakoch (60 – 70 MPa) s čím súvisia vysoké požiadavky pri výrobe na bezpečnosť systému počas prevádzky.

2.3.1 PALIVOVÝ ČLÁNOK

Ako je spaľovací motor srdcom pre konvenčný automobil, takisto palivový článok je zodpovedný za prevádzku FCEV. Energia vyrobená v palivovom článku je uskladnená v akumulátore, ktorý následne poháňa elektromotor. Existuje niekoľko typov palivových článkov, jeden z najrozšírenejších je s membránou pre výmenu protónov (PEMFC – proton exchange membrane fuel cells). Z konštrukčného hľadiska tieto palivové články obsahujú:

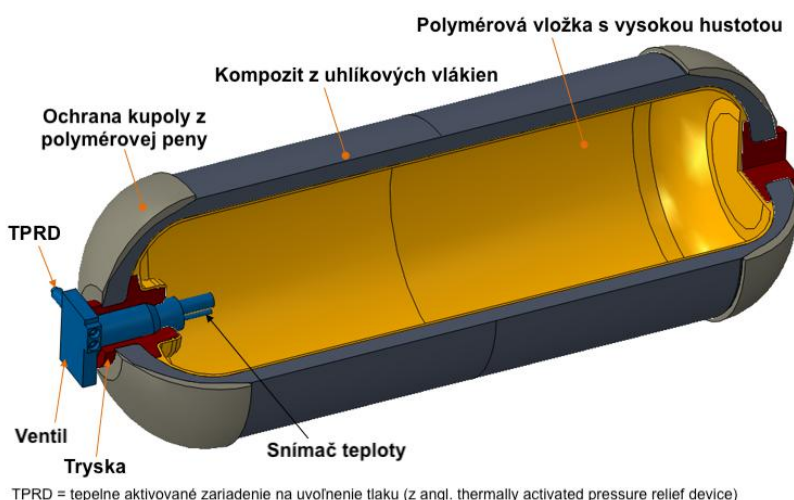
- membránu (elektrolyt) vyrobenú z perfluórsulfónovej kyseliny,
- anódu a katódu, ktorých povrch je z tenkej vrstvy platiny a uhlíkového papiera, pričom teflon (polytetrafluóretylén) je použitý ako spojovací materiál,
- difúzne vrstvy vyrobené taktiež z uhlíkového papiera a teflonu,
- tesnenia vyrobené zo silikónovej gumy,
- bipolárne platne, tvoriace až 80 % hmotnosti palivového článku (a 50 % celkovej sumy palivového článku), ktoré sú vyrobené z grafitu, nerezovej ocele, hliníka a titánu [55][56].



Obr. 2.6 Tretia generácia palivového článku vozidla Hyundai Nexu pre rok 2024, výkon 100 kW [57]

2.3.2 SÚSTAVA PRE SKLADOVANIE VODÍKA

Vodík je najľahší a najjednoduchší plyný chemický prvok, v Periodickej tabuľke prvkov sa vyskytuje pod molekulárnym vzorcom H_2 , pričom v prírode sa vodík osamotený nenachádza a pri zrode atómového vodíka sa okamžite spája do molekuly H_2 . Je to bezfarebný, netoxický plyn bez zápachu, ktorý je však vysoko horľavý, výbušný a reaktívny (ľahko oxiduje s kyslíkom). Vodík má ako palivo alebo nosič energie veľký potenciál – spálením 1kg vodíka sa uvoľní viac ako dvojnásobok použiteľnej tepelnej energie, v porovnaní so spálením 1kg ľubovoľného paliva (drevo, uhlie, plyn, nafta, benzín) [58]. Jeho hlavnou nevýhodou je však nízka objemová hustota. Pri teplote $25\text{ }^\circ\text{C}$ a atmosférickom tlaku objemová hustota odpovedá hodnote $0,081\text{ kg/m}^3$. Pri týchto hodnotách by vozidlo na dojazd 100 km potrebovalo nádrž s objemom $12,34\text{ m}^3$ (počítané s priemernou spotrebou 1 kg vodíka / 100 km). Vodík v nádržiach FCEV je stlačený pod vysokým tlakom (z dôvodu nízkej objemovej hustoty vodíka je nutné ho stlačiť k zabezpečeniu zásoby na dostatočný pohon), konkrétne 60-70 MPa, kedy objemová hustota dosahuje hodnoty približne $38,256\text{ kg/m}^3$ [59]. Z tohto dôvodu sa dbá na bezpečnosť vodíkových nádrží, ktoré sú vyrábané z kvalitných materiálov s vysokou pevnosťou. Vnútorný povrch nádrží na vodíkové palivo vozidla Hyundai Nexu je vyrobený z tenkej polyamidovej vložky (nylon), ktorá minimalizuje prenikanie vodíka. Vonkajší povrch je pokrytý vystuženým plastom – uhlíkovým kompozitom s epoxidom o hrúbke 20-25 mm, ktorý je schopný udržať tlak 70 MPa, pričom pomer napätia uhlíkových vlákien pri prevádzkovom tlaku k napätiu vlákien pri tlaku počas roztrhnutia je definovaný na hodnotu 0,5 [60]. Pevnosť a tuhosť sú dôležité pre bezpečnosť nádrží na vodíkové palivo. Pevnosť zabezpečuje odolnosť voči roztrhnutiu, zatiaľ čo tuhosť zabezpečuje trvanlivosť a odolnosť voči deformácii pri pôsobení sily. Plasty vystužené uhlíkovými vláknami majú mnoho výhod, z ktorých najvýznamnejšie sú 6-násobne vyššia pevnosť a 4-násobne vyššia tuhosť v porovnaní s oceľou [61]. To znamená, že vystužené plasty sú spoľahlivejšie a zároveň ľahšie.



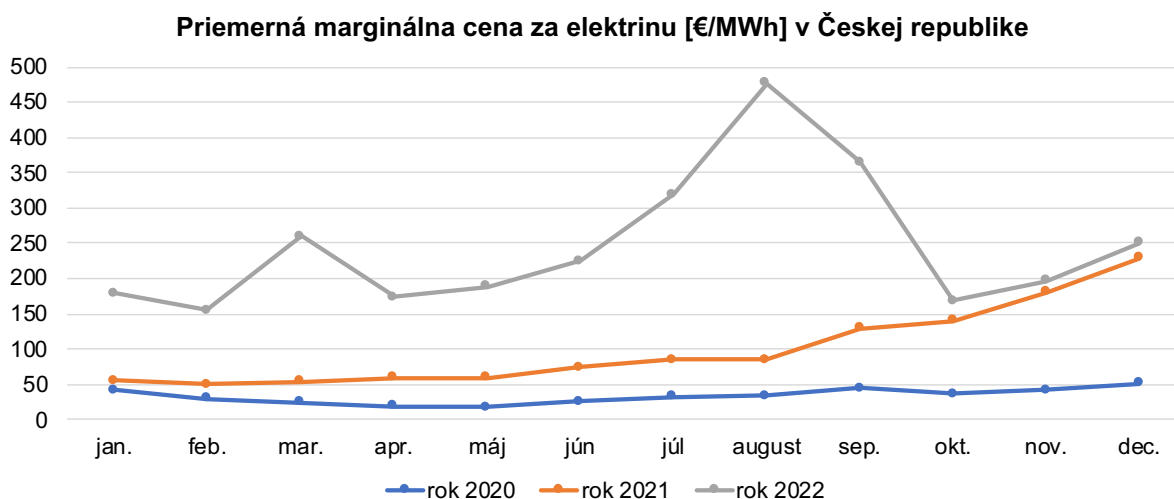
Obr. 2.7 Model kompozitnej tlakovej nádrže na vodík, typ IV, upravené [62]

TPRD je zariadenie na uvoľnenie tlaku z nádrže v prípade prehriatia – zvyčajne nad $110\text{ }^\circ\text{C}$. TPRD obsahuje sklenenú poistku, ktorá sa pri dosiahnutí kritickej teploty zničí, čím sa vo veľmi krátkom čase uvoľní vodík z nádrže skrz bezpečnostný ventil [63].

3 ENERGETICKÁ NÁROČNOSŤ FÁZ AUTOMOBILU

Energetická náročnosť je, podľa definície obsiahnutej v norme ISO 50001, merateľným výsledkom týkajúcim sa energetickej účinnosti, využitia energie a spotreby energie, pričom energetická účinnosť predstavuje fyzikálnu veličinu, definovanú ako pomer medzi energiou vystupujúcou zo stroja a celkovou energiou, ktorá do stroja vstupuje. Hodnota energetickej účinnosti je bezrozmerná a vždy menšia ako 1 [64]. Význam normy môže znieť máťúco, zjednodušene sa dá ale povedať, že ide o mieru spotreby energie potrebnej na vykonanie určitej činnosti, procesu alebo na prevádzku určitého zariadenia.

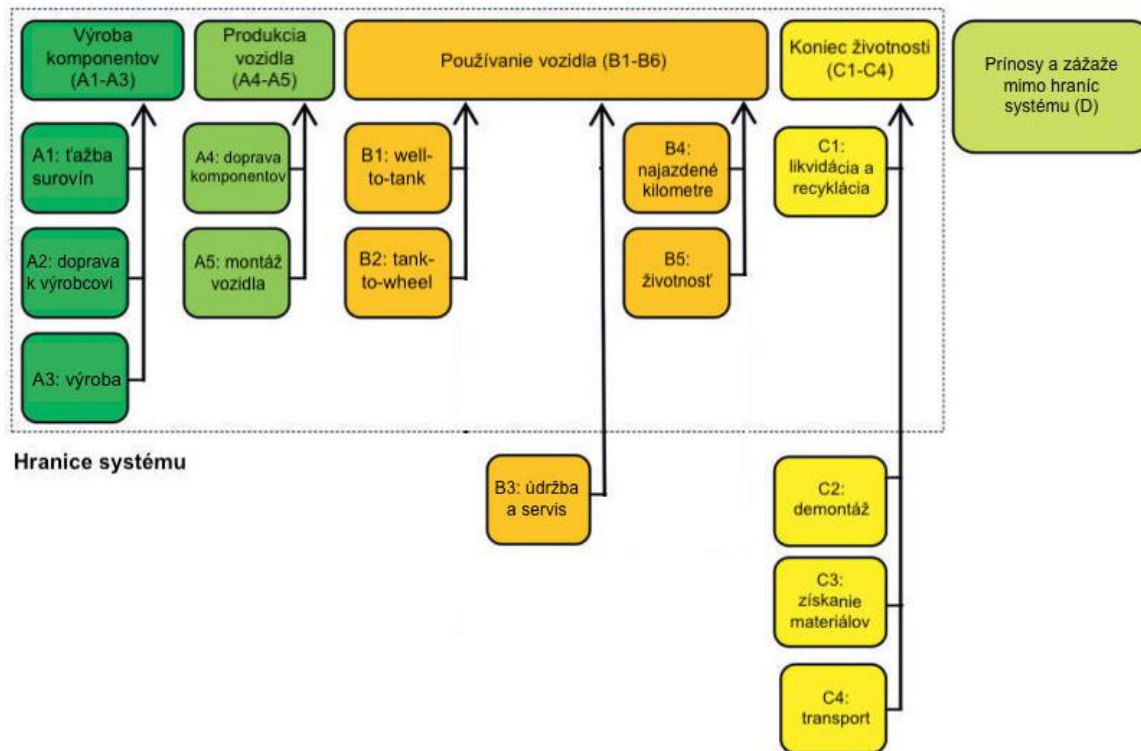
V čase písania diplomovej práce je aktuálnou témou šetrenie energií vo všetkých odvetviach priemyslu, ako aj v domácnostiach. Kvôli sérii negatívnych udalostí ako nečakané (dočasné) odstavenie 18 reaktorov jadrových elektrární vo Francúzsku, zvýšenie cien pohonných hmôt, zvyšujúce sa požiadavky na zníženie emisií skleníkových plynov, zvýšenie dopytu po emisných povolenkách alebo kvôli vojne na Ukrajine, vzrástla cena elektriny za 1 MWh z 33,60 € (rok 2020), na 100,36 € (rok 2021), respektíve 246,62 € (rok 2022)⁵ [65]. Tento viac ako 700% nárast cien elektriny je graficky znázornený na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Priemerná marginálna cena za elektrinu [€/MWh] v Českej republike

Cieľom výrobcov automobilov je zníženie energie potrebnej na výrobu automobilu na minimum, pričom každý z predstavených pohonov vykazuje inú energetickú náročnosť. Obsahom tejto kapitoly bude priblíženie výpočtov týkajúcich sa dopadu energetickej náročnosti na výrobu, prevádzku a likvidáciu konkrétneho vozidla, reprezentujúceho jeden z pohonov (ICE, BEV, FCEV). Úvahy budú zamerané na výrobu komponentov potrebných pre výrobu vozidla, prevádzku vozidla a koniec životnosti vozidla. Tieto kategórie sú graficky zobrazené na Obr. 3.2, pričom každá kategória predstavuje jednotlivé moduly životného cyklu.

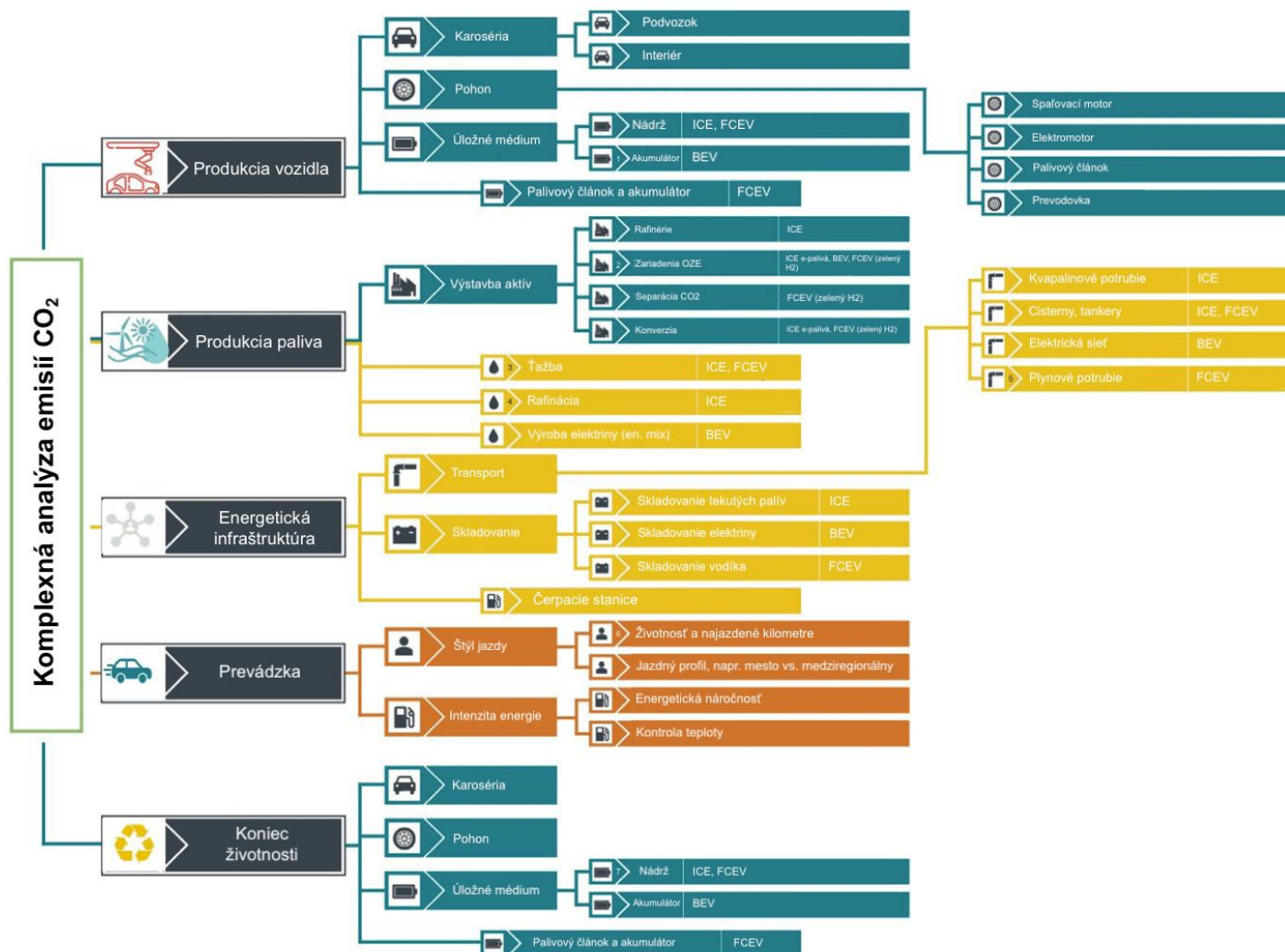
⁵ Ceny za elektrinu [€/MWh] predstavujú ročný priemer marginálnych cien v Českej republike, získaných zo štatistík vedených OTE-ČR.



Obr. 3.2 Moduly životného cyklu vozidla, upravené [67]

Moduly životného cyklu vozidla zobrazené na obrázku vyššie sa skladajú z troch hlavných fáz – výroby, prevádzky a likvidácie vozidla, ktoré sa ďalej delia na podkategórie. Podkategórie výroby komponentov (A1-A3) predstavujú ťažbu nerastných surovín, dopravu materiálu k výrobcovi a samotnú výrobu komponentov. Produkcia vozidla (A4-A5) sa skladá z dopravy komponentov a montáže vozidla. Do prevádzky vozidla (B1-B5) sú zahrnuté podkategórie well-to-tank, tank-to-wheel, najazdené kilometre počas života vozidla a roky prevádzky vozidla, pričom mimo hranice systému sa nachádzajú údržba a servis vozidla. Koniec životnosti (C1-C4) obsahuje likvidáciu a recykláciu vozidla, pričom mimo hranice systému sú podkategórie demontáž, získanie materiálov pre opätovné použitie a transport.

Energetická náročnosť jednotlivých fáz sa líši v závislosti na type pohonu vozidla, pričom do životného cyklu je možné pridávať moduly pre exaktnejšie vyjadrenie komplexnej energetickej náročnosti, čoho príkladom je ilustračná rozšírená mapa modulov životného cyklu vozidla, ktorá je zobrazená na Obr. 3.3. Mapa slúži na predstavu komplexnosti systému výpočtov pre životnosť vozidla.



Obr. 3.3 Ilustračná, rozšírená mapa modulov životného cyklu vozidla, upravené [66]

3.1 VÝROBA KOMPONENTOV A PRODUKCIA VOZIDLA (A1-A5)

Modul výroby komponentov obsahuje ťažbu nerastných surovín, ich dopravu k výrobcovi a samotnú výrobu, pričom tento proces priamo nadväzuje na modul produkcie vozidla, do ktorého sa zahŕňa doprava vyrobených komponentov a samotná montáž vozidla.

ICE

Vozidlo reprezentujúce kategóriu ICE predstavuje Škoda Octavia III 1,8 TSI, s hmotnosťou 1 320 kg. Podľa zdroja [39], hmotnosť moderného automobilu je približne tvorená percentuálnym podielom týchto materiálov: sklo – 3,1 %, guma – 4,0 %, tlmiace materiály – 1,1 %, plast – 16 %, lak – 0,9 %, ľahké kovy – 2,5 %, elektrotechnika/káble – 1,3 %, neželezné kovy – 1,6 %, palivo/olej/mazacie látky – 5,3 %, ostatné – 0,2 %, ocel/železo – 64,0 %. V Tab. 3.1 je prepočítaná hmotnosť jednotlivých materiálov na základe hmotnosti reprezentujúceho vozidla.

Tab. 3.1 Percentuálny podiel a hmotnosť materiálov vo vozidle

Materiál	Percentuálny podiel vo vozidle [%]	Hmotnosť [kg]
sklo	3,1	40,9
guma	4,0	52,8
tlmiace materiály	1,1	14,5
plast	16,0	211,2
lak	0,9	11,9
ľahké kovy	2,5	33,0
elektronika/káble	1,3	17,2
neželezné kovy	1,6	21,1
palivo/olej/mazacie látky	5,3	70,0
ostatné	0,2	2,6
ocel/železo	64,0	844,8

Z Tab. 3.1 je možné konštatovať, že väčšinu hmotnosti vozidla tvoria oceľové prvky, nasledujú plastové komponenty, ďalej mazacie látky a palivo, komponenty vyrobené z gumy a skla. Elektronika vozidla, tvorená medenými káblowymi zväzkami predstavuje iba 1,3 % z celkovej hmotnosti vozidla.

Výroba automobilu je komplexný dej zahŕňajúci stovky procesov, ktoré na seba nadväzujú. Štúdiá na energetickú náročnosť výroby v automobilovom priemysle [68] sa zamerala na materiálové toky v technologických procesoch prvej fázy automobilu. Do výpočtov boli zahrnuté počiatočné výrobné procesy (ťažba nerastných surovín), ktorých výstupom je surovina, ktorá vstupuje do procesu výroby komponentov, ktoré sú použité pri montáži vozidla. Výsledkami štúdie [68] sú zistenia, že procesy ťažby a výroby materiálu predstavujú 68 % celkovej spotreby energie pri výrobe automobilu. Energeticky najnáročnejšie je spracovanie medenej rudy, z dôvodu jej nízkej koncentrácie v hornine. Zo zistení taktiež vyplýva, že na výrobu 1 kg vozidla je potrebných približne 5,23 kg surovín.

Zdroj [70] uvádza energetickú náročnosť jednotlivých výrobných procesov s percentuálnym podielom zastúpenia konkrétneho technologického procesu na výrobe vozidla. Tab. 3.2 predstavuje výber hodnôt uvádzaných v tejto štúdii.

Tab. 3.2 Energetická náročnosť a produkcia CO₂ emisií procesom odlievania pre hliník a železo

Proces - odlievanie	Energetická náročnosť [MJ/kg]		CO ₂ emisie [kg/kg]	
	Priemer	Rozsah	Priemer	Rozsah
Hliník	55,3	33,1 - 88,4	3,1	1,83 - 4,95
Železo	32,0	24 - 36,1	1,7	0,45 - 2,46

Zo získaných hodnôt by napríklad výpočet energetickej náročnosti výroby hlavy valcov s hmotnosťou 25 kg (vyrobená z hliníka procesom odlievania) vyzeral nasledovne:

$$m_{HV} \cdot EN_{Al} = 25 \cdot 55,3 = 1382,5 \text{ MJ}^6$$

m_{HV} hmotnosť hlavy valcov

EN_{Al} priemerná energetická náročnosť odlievania hliníka

Iná štúdia, vypracovaná automobilovou spoločnosťou Volkswagen v spolupráci s Centrom výskumu environmentálnych systémov Univerzity Kassel, vypracovala štúdiu životného cyklu vozidla Volkswagen Golf. Výsledkami tejto štúdie je zistenie, že na výrobu komponentov a montáž vozidla s hmotnosťou 1059 kg je potrebných 85,6 GJ energie [69]. Podľa týchto výpočtov je potrebných 106,7 GJ energie pre výrobu vozidla Škoda Octavia s hmotnosťou 1320 kg.

BEV

Vozidlo reprezentujúce batériové elektromobily je Tesla Model 3 Standard Range Plus (Tesla Model 3 SR+), s celkovou hmotnosťou 1 611 kg, pričom hmotnosť 55,4 kWh akumulátora (vrátane článkov, krytia a kabeláže) je približne 378 kg [71]. Ako je zobrazené na Obr. 3.3, výroba batériového elektromobilu sa v porovnaní s výrobou vozidla so spaľovacím motorom zhoduje vo výrobe karosérie (spoločný podvozok a interiér). Rozdiel predstavuje výroba pohonnej jednotky (elektromotor) a úložného média (akumulátor). Práve ťažba nerastných surovín potrebných pre výrobu akumulátora je energeticky najnáročnejší proces výroby batériového elektromobilu. Doposiaľ prevládala výroba NMC akumulátorov, ktoré sú zložené z katódovej kombinácie nikel-mangán-kobaltu. Ťažba kobaltu je však náročná a finančne drahá – z toho dôvodu sa výrobcovia akumulátorov snažia vyhnúť použitiu tohto kovu. Vyriešiť to môžu LFP akumulátory, ktoré sú založené na báze lítium-železo-fosfátu (LiFePO₄). Oproti NMC akumulátorom majú LFP akumulátory výhodu v tom, že majú vyššiu výkonovú hustotu, môžu sa nabíjať z 0 na 80 % za menej ako 20 min a výrobná cena je vďaka absencii kobaltu výrazne nižšia [72]. V Tab. 3.3 sú zobrazené minerály potrebné pre výrobu BEV, popredné krajiny, v ktorých sa ťažia a tiež porovnanie priemerného BEV s priemerným ICE z pohľadu obsahu množstva

⁶ Výpočet nezahŕňa energiu potrebnú pre ťažbu nerastných surovín.

týchto minerálov. Dáta pochádzajú z Amerického geologického výskumu (USGS) [73] a Medzinárodnej energetickej agentúry (IEA) [74], pričom reprezentujú ťažbu minerálov potrebných pre výrobu NMC akumulátorov.

Tab. 3.3 Minerály vyskytujúce sa v BEV, najvýznamnejšie krajiny ich ťažby a porovnanie výskytu s ICE

Minerál	Hlavné zdroje dovozu	Množstvo v priemernom BEV [kg]	Množstvo v priemernom ICE [kg]
Prírodný grafit	Čína, Mexiko, Kanada, India	66,3	-
Meď	Čile, Kanada, Mexiko	53,2	22,3
Nikel	Kanada, Nórsko, Fínsko, Rusko	39,9	-
Mangán	Gabon, Južná Afrika, Austrália, Gruzínsko	24,5	11,2
Kobalt	DRC, Nórsko, Kanada, Japonsko, Fínsko	13,3	-
Lítium	Argentína, Čile, Čína, Rusko	8,9	-
Vzácné zeminy	Čína, Estónsko, Japonsko, Malajzia	0,5	-
Zinok	Kanada, Mexiko, Peru, Španielsko	0,1	0,1
Iné	-	0,3	0,3

pozn. 1.: DRC – Democratic Republic of Congo, Konžská demokratická republika, pozn. 2.: ICE obsahuje komponenty ako napríklad magnetické senzory a elektronické súčiastky, ktoré obsahujú kobalt, avšak hmotnosť kobaltu je minimálna a v celkovej hmotnosti vozidla zanedbateľná

Z Tab. 3.3 vyplýva, že z ôsmich predstavených nerastných surovín, potrebných pre výrobu BEV, sa pre výrobu ICE ťažia iba tri – meď, mangán a zinok, pričom spotreba medi a mangánu je v prípade výroby BEV viac ako dvojnásobná.

Napríklad ak by sme vzali dáta zo zdroja [51], že približne 11 % hmotnosti akumulátora je meď, pre akumulátor vozidla Tesla Model 3 SR+, to predstavuje 41,6 kg medi. Len pre predstavu, obsah medi v medenej rude je okolo 1,32 %, čo znamená vyťažiť aspoň 3 151,5 kg horniny k získaniu potrebného množstva medi na výrobu. Energetická náročnosť ťažby sa pohybuje v rozmedzí 25 – 30 GJ na tonu kovu [75]. To znamená, že na ťažbu medi potrebnej pre výrobu akumulátora vozidla Tesla Model 3 SR+, je potrebných približne 1,14 GJ energie.

V prípade prírodného grafitu výpočty vyzerajú nasledovne: 15 % hmotnosti akumulátora tvorí grafit [51], pre akumulátor vozidla Tesla Model 3 SR+, to predstavuje 56,7 kg grafitu. Podľa zdroja [76] je priemerná koncentrácia grafitu v hornine 14 %. Na výrobu akumulátora je potrebné vyťažiť 405 kg horniny obsahujúcej grafit. Energetická náročnosť ťažby je podľa zdroja [77] 112,48 GJ na tonu grafitu. Z toho vyplýva energetická náročnosť s hodnotou 6,38 GJ pre ťažbu grafitu potrebného pre výrobu akumulátora vozidla Tesla Model 3 SR+.

Výroba akumulátora má z pohľadu energetickej náročnosti najväčší podiel z výroby BEV. Existuje množstvo štúdií zameraných na výpočet energetickej náročnosti výroby akumulátora, pričom výpočty vykazujú značný rozptyl hodnôt v závislosti na tom, ktorých fáz výroby sa týkajú, akú technológiu výroby popisujú a kde sa výroba uskutočňuje. Jedna z najkomplexnejších štúdií [78] popisuje dáta získané tzv. systémom top-down (zahŕňa aj spotreby všetkých pomocných výrobných procesov), kde autori štúdie prichádzajú k záveru, že na výrobu akumulátora s kapacitou 1 kWh

je potrebných 586 MJ energie, pričom s rastúcou kapacitou akumulátora, energia potrebná na výrobu rastie približne lineárne. V prepočtoch na akumulátor použitý v elektromobile Tesla Model 3 SR+ s kapacitou 55,4 kWh, to vychádza, že na jeho výrobu bolo potrebných približne 32,5 GJ energie. Zdroj [79] zase uvádza hodnotu od 339 do 433 kWh/kWh akumulátor. V prepočte na GJ a akumulátor s kapacitou 55,4 kWh to znamená, že energetická náročnosť výroby sa pohybuje od 67,6 GJ do 86,4 GJ.

Spoločnosť Green NCAP spustila 1.12.2022 na svojej internetovej stránke interaktívny nástroj na výpočet LCA vozidiel, pričom hodnoty je možné porovnávať na základe miesta prevádzky vozidla, energetického mixu krajiny a používania vozidla. Výpočty sú zamerané na produkciu skleníkových plynov (vyjadrené v CO₂ ekv.) a energetickú náročnosť (vyjadrenú v MWh) jednotlivých fáz života vozidla. Po zadefinovaní vozidla Tesla Model 3 Standard Range Plus, s motorom o výkone 239 kW vychádza energetická náročnosť produkcie vozidla vrátane akumulátora na hodnotu 196,93 GJ [80].⁷

FCEV

Vozidlo reprezentujúce túto skupinu je Toyota Mirai druhej generácie, s akumulátorom o kapacite 4 Ah (menovité napätie 310,8 V, čo predstavuje 1,24 kWh)⁸, pričom hmotnosť palivových článkov je 52 kg [82]. Nakoľko elektromobily s palivovými článkami predstavujú pomerne novú metódu mobility, neexistuje množstvo štúdií, ktoré by sa zameriavali na energetickú náročnosť výroby týchto vozidiel. Štúdia [83] je jednou z mála, ktoré sa zameriavajú na životný cyklus FCEV. Do výpočtov pre výrobu komponentov sa počítalo s energetickou náročnosťou ocele, ale aj s inými materiálmi potrebnými pre výrobu palivových článkov ako polymérová membrána, platina, grafit, atď. Zo štúdie vyplýva, že takmer 75 % z energie potrebnej na celý životný cyklus vozidla tvorí energia, ktorá je použitá pri výrobe komponentov a výrobe vozidla. Konkrétne pre produkciu materiálov to predstavuje 95,84 GJ a montáž vozidla 25,08 GJ, čo v súčte tvorí 120,92 GJ, pričom vozidlo použité v štúdiu vážilo 886 kg [83]. V porovnaní s Toyotou Mirai, ktorá váži 1 900 kg je to o takmer 115 % menej. Ak by sme vychádzali za predpokladu, že na výrobu 1 kg FCEV je potrebných približne 0,136 GJ energie, na výrobu Toyoty Mirai je potrebných 259,3 GJ energie.

3.2 PREVÁDZKA VOZIDLA (B1-B5)

Prevádzka vozidla začína v momente, kedy vozidlo opustí výrobný závod, v ktorom bolo vyrobené. Ako bolo zobrazené na Obr. 1.1, do životného cyklu vozidla sa v prípade energie potrebnej na pohyb započítava iba obdobie tank-to-wheel, to znamená, že výpočty neberú do úvahy extrakciu materiálov potrebných pre výrobu nosiča energie (palivo, elektrina, vodík), jeho výrobu a distribúciu k zákazníkom. Avšak pri celkovej analýze je potrebné započítať aj obdobie výroby paliva, nakoľko výroba benzínu, elektriny a vodíka sa značne líši. Rozhodujúcim faktorom pri úvahách o energetickej náročnosti prevádzky pohonov je počet najazdených kilometrov za životnosť vozidla, priemerná spotreba na 100 km a miesto prevádzky –

⁷ Výpočet bol upravený pre vozidlo obsahujúce akumulátor s kapacitou 55,4 kWh.

⁸ $kWh = \frac{Ah \cdot V}{1000}$

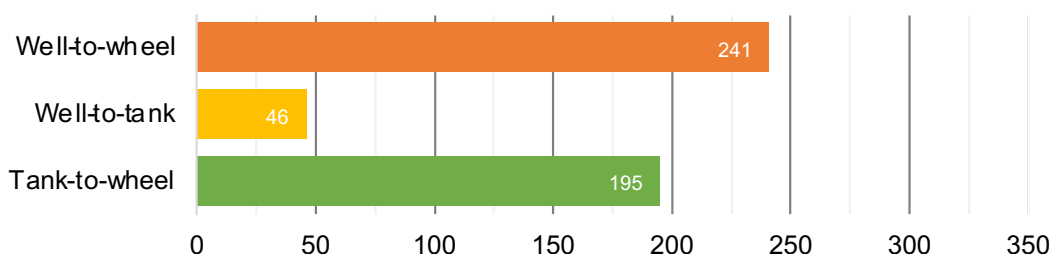
Európa. Zdroj [84] uvádza priemerný počet najjazdených kilometrov osobných vozidiel v Európe za rok. Podľa tohto zdroja automobily so zážihovým motorom prejdú v priemere 10 800 km/rok, automobily so vznetrovým motorom 16 800 km/rok. Priemer týchto dvoch hodnôt predstavuje 13 800 km/rok. Iný zdroj [85] uvádza priemernú životnosť osobných vozidiel, pričom podľa tohto zdroja je priemerný vek osobných vozidiel v Českej republike približne 15 rokov. Hodnota 207 000 km ($13\,800 \text{ km/rok} \cdot 15 \text{ rokov}$) reprezentuje počet najjazdených kilometrov za celkovú životnosť priemerného vozidla v Českej republike. Smernica Európskeho parlamentu a Rady z roku 2009 [86] uvádza hodnotu 200 000 najjazdených kilometrov za dobu životnosti osobného vozidla. Výpočty v nasledujúcej kapitole budú počítané so zaokrúhlenou hodnotou 200 000 km/rok.

ICE

Vybrané vozidlo Škoda Octavia III používa na pohon benzín, v dnešnej dobe dostupný na čerpacích staniciach pod názvom E5, E10, či E85, pričom číslo vyjadruje percentuálny podiel etanolu v benzíne. Kombinovaná spotreba je motoristickými žurnalistami udávaná na hodnotu 6,1 l/100 km [87]. Rozsiahla štúdia [88], vydaná Európskou komisiou v roku 2020 sa zameriavala na energetickú náročnosť prevádzky rôznych pohonov (well-to-wheel). Do výpočtov boli zahrnuté procesy od ťažby surovej ropy, jej transport do rafinérie, proces premeny na benzín a distribúciu (well-to-tank), ako aj proces premeny paliva v konkrétnom systéme pohonu (tank-to-wheel). Autori tejto štúdie došli k záverom, že celková energetická náročnosť paliva potrebného pre chod vozidla so spaľovacím motorom je 215 MJ/100 km [88]. Z hodnoty 215 MJ/100 km patrí 41 MJ/100 km obdobiu well-to-tank a 174 MJ/100 km obdobiu tank-to-wheel. Percentuálne obdobiu well-to-tank patrí 19,1 % a obdobiu tank-to-wheel 80,9 % z celkovej energetickej náročnosti prevádzky vozidla.

Výpočty pre vozidlo Škoda Octavia vyzerajú nasledovne: výhrevnosť benzínu je 32 MJ/l [89], spotreba vozidla je 6,1 l/100 km, čo predstavuje energetickú náročnosť vozidla pre obdobie tank-to-wheel 195 MJ/100 km ($32 \cdot 6,1 = 195,2$). Ak by sme použili percentuálny podiel well-to-tank zo štúdie [88], pre vozidlo Škoda Octavia by to predstavovalo 46 MJ/100 km. Hodnoty sú graficky zobrazené na Obr. 3.4.

Energetická náročnosť prevádzky ICE [MJ/100 km]



Obr. 3.4 Energetická náročnosť prevádzky ICE [MJ/100 km]

Z uvedených dát vyplýva, že celková energetická náročnosť prevádzky vozidla Škoda Octavia III je 482 GJ (v prípade 200 000 km).

BEV

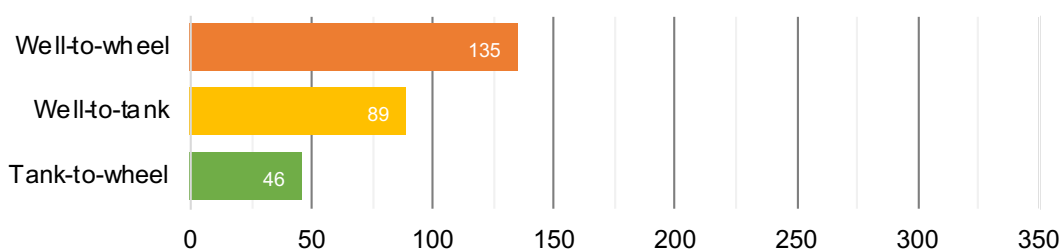
V prípade batériových elektromobilov energetická náročnosť fázy well-to-wheel závisí od miesta prevádzky, a to konkrétne zdroja, z ktorého sa elektromobil dobíja. Energetická náročnosť výroby 1 MJ energie z uhlia je odlišná od výroby 1 MJ energie zo zemného plynu. V štúdiu [88] je počítané s energetickým mixom Európy – priemernými hodnotami získanými z energetických mixov členských štátov EÚ. Energetický mix Európy je vyobrazený v Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Energetický mix Európy v roku 2020, hodnoty vyjadrujú percentuálny podiel v % z celkovej výroby elektriny [90]

Zdroj výroby	Uhlie	Zemný plyn	Jadro	Voda	Vietor, solar, atď.	Biopalivá a odpad	Ropa
% podiel [%]	12,7	26,5	11,9	3,1	4,8	10,2	30,8

Výsledkom štúdie je, že v prípade elektromobilov na získanie dojazdu 100 km, je potrebných 135 MJ energie, z toho 89 MJ je spotrebovaných pri výrobe elektriny (well-to-tank) a 46 MJ je spotrebovaných pri prevádzke vozidla (tank-to-wheel) [88]. Hodnoty sú graficky zobrazené na Obr. 3.5.

Energetická náročnosť prevádzky BEV [MJ/100 km]



Obr. 3.5 Energetická náročnosť prevádzky BEV [MJ/100 km]

Z uvedených dát vyplýva, že predstavený batériový elektromobil Tesla Model 3 Standard Range Plus potrebuje 270 GJ na prejde 200 000 km.⁹

FCEV

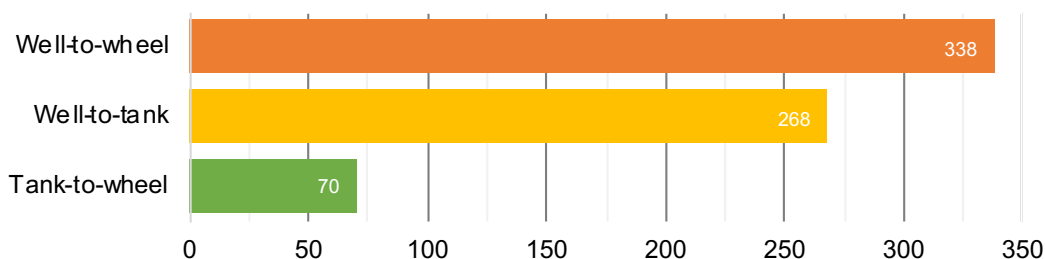
Energetická náročnosť výroby vodíka potrebného pre chod elektromobilu s palivovými článkami závisí od spôsobu jeho výroby. Vodík je možné kategorizovať do troch základných skupín – sivý, modrý a zelený vodík. V dnešnej dobe prevláda výroba sivého vodíka (až 96 %) z tzv. parného reformingu zemného plynu, čo je chemický proces pri ktorom sa vodná para s teplotou 750 – 950 °C privádza k metánu. Celá zmes následne reaguje za vzniku vodíka, oxidu uhoľnatého a oxidu uhličitého. Celková účinnosť tohto procesu je okolo 75 %, avšak vzniká pri ňom veľké množstvo CO₂, konkrétne na výrobu 1 kg sivého vodíka sa vyprodukuje 9 - 12 kg CO₂. Zvyšné 4 % z celkovej výroby vodíka patria výrobe modrého a zeleného vodíka. Prívlastok modrý má vodík vyrobený parným reformingom zemného plynu s technológiou zachytávania oxidu uhličitého (tzv. CCS – carbon capture storage).

⁹ Treba poznamenať, že všetky skúmané varianty pohonu v štúdiu [88] predstavujú len teoretické konfigurácie vozidla a nezodpovedajú žiadnemu existujúcemu vozidlu alebo značke. Definície majú zaručiť reprezentatívny prehľad o priemerných európskych osobných vozidlách segmentu C.

V prípade výroby modrého vodíka sú emisie znížené o 95 % voči výrobe sivého vodíka. Zelený vodík sa vyrába pomocou elektrolýzy vody, pričom elektrina potrebná pre chod elektrolýzéra pochádza z obnoviteľných zdrojov. Pri elektrolýze vody dochádza v roztoku k štiepeniu chemickej väzby medzi vodíkom a kyslíkom za vzniku plynného vodíka a kyslíka. Účinnosť tohto procesu je v dnešnej dobe 50 – 60 %. Na výrobu 1 kg zeleného vodíka je potrebných približne 9 l demineralizovanej vody a približne 50 kWh elektrickej energie [91]. Existujú aj iné spôsoby výroby vodíka, pričom takto vyrobený vodík je označovaný ako biely, hnedý, tyrkysový, atď. Potom je nutné vodík stlačiť alebo skvapalniť z dôvodu transportu k odberovým miestam pomocou potrubí alebo kryogénnych cisterien. Zdroj [92] uvádza, že vodík je v cisternách stlačený na tlak 180 bar, pričom zdroj [93] uvádza, že na stlačenie 1 kg vodíka (na 180 bar) je potrebných 14 MJ energie (pre porovnanie, stlačenie 1 kg metánu vyžaduje 2 MJ energie). Následne je vodík uskladnený na odberovom mieste vo veľkoobjemových oceľových tlakových nádobách v plynnom skupenstve do času, kedy sa s ním nenaplní nádrž osobného automobilu pod tlakom 700 bar, alebo nádrž nákladného automobilu alebo autobusu pod tlakom 350 bar [91].

Výsledkom štúdie [88] je zistenie, že na prejde 100 km vo vozidle s palivovými článkami je potrebných 338 MJ energie (well-to-wheel), z toho 268 MJ je použitých pri výrobe vodíka a jeho transportu k odberovým miestam (well-to-tank) a zvyšných 70 MJ energie je potrebných pri prevádzke vozidla (tank-to-wheel). Hodnoty sú graficky zobrazené na Obr. 3.6.

Energetická náročnosť prevádzky FCEV [MJ/100 km]



Obr. 3.6 Energetická náročnosť prevádzky FCEV [MJ/100 km]

Z uvedených dát vyplýva, že predstavený elektromobil s palivovými článkami Toyota Mirai potrebuje na prejde 200 000 km energiu rovnajúcu sa hodnote 676 GJ.

3.3 KONIEC ŽIVOTNOSTI (C1-C4)

Automobilový priemysel čelí výzvam, ktoré sú spojené s hromadením starých dielov a potrebou recyklácie materiálov. S narastajúcim počtom automobilov a produkciou škodlivín, ktoré ohrozujú životné prostredie, sa dbá na recykláciu ešte viac. Už pri výstavbe automobilových závodov sa dbá na minimalizovanie hlukovej, emisnej, dopravnej a inej záťaže, ktorá by mohla ohrozovať ľudí a prírodu. Ako je zobrazené na Obr. 3.2, fáza konca životnosti obsahuje recykláciu alebo likvidáciu vozidla. Recyklácii predchádza demontáž vozidla na jednotlivé komponenty k získaniu materiálov pre výrobu nového vozidla. V súčasnosti je podľa platných noriem Európskej únie potrebné zrecyklovať, zhodnotiť alebo opätovne použiť 95 %

hmotnosti vyradeného vozidla [94]. V nasledujúcej tabuľke sa nachádza údaj o priemernej miere recyklácie materiálov z vozidiel po uplynutí ich životnosti.

Tab. 3.5 Priemerná miera recyklácie materiálov vo vozidle [95]¹⁰

Materiál	Priemerná miera recyklácie [%]
Železné kovy	99,82
Hliník	93,2
Meď	88,53
Zinok	93,49
Olovo	91,43
PP	51,99
PE	51,99
PMMA	3,00
ABS	49,27
PET	0,73
EPP	2,93
PP-EPDM	5,55
PU	5,58
Guma	3,47
Textil	6,19

Ako je z tabuľky evidentné, najefektívnejšie sa recyklujú kovy – oceľ, železo, meď, zinok a olovo. Približne polovica sa zrecykluje v prípade plastov polypropylén, polyetylén a ABS. Ostatné materiály sa recyklujú v jednotkách percent.

Spotreba energie pri spracovaní vozidla po skončení životnosti sa môže líšiť v závislosti od konkrétnej použitej metódy spracovania. Tie sa môžu rozdeliť do troch základných skupín: demontáž, drvenie a separácia materiálov. Proces demontáže zahŕňa odstránenie všetkých nebezpečných materiálov, vypustenie kvapalín a oddelenie častí a materiálov na recykláciu. Po demontáži sa vozidlo zvyčajne rozdrví na malé časti. Tento proces zahŕňa vloženie vozidla do drviča, ktorý ho pomocou výkonných rotujúcich nožov rozdrví na malé kúsky. Po rozdrvení vozidla sa materiály oddelia a recyklujú. Pri tom sa používajú rôzne techniky na oddelenie kovov, plastov, skla a iných materiálov.

V súčasnosti je zložité vyhľadať štúdie, ktoré sa zaoberajú recykláciou ICE, ako aj BEV. Štúdie, ktoré boli publikované sa do veľkej miery odlišujú v hodnotách o energetickej náročnosti tohto procesu, nakoľko každá je zameraná na iný postup recyklácie a opätovné využitie materiálov. Nasledujúca časť tejto kapitoly je odhad reálnych hodnôt, založený na vybraných štúdiách.

ICE A BEV

Z pohľadu recyklácie sú automobily so spaľovacím motorom najjednoduchším variantom z pomedzi predstavených pohonov. Väčšinu hmotnosti vozidla tvoria železné kovy ako železo a oceľ, ktoré je možné do vysokej miery recyklovať. Proces recyklácie je efektívnejší aj vďaka materiálovému označeniu komponentov pri ich

¹⁰ PP – polypropylén, PE – polyetylén, PMMA – polymethylmethakrylát, ABS – akrylonitrilbutadiénstyren, PET – polyetyléntereftalát, EPP – extrudovaný polypropylén, PP-EPDM – gumou modifikovaný polypropylén, PU - polyuretán

výrobe. Naopak začínajúcim trendom vyradených batériových elektromobilov je sekundárne využitie akumulátora na statické využitie – v inom prípade je nutné špeciálne zlikvidovanie, za ktoré sú zodpovedné automobilové firmy vyrábajúce elektromobily.

Štúdia [96] je zameraná na vplyv recyklácie na spotrebu energie v Číne pre batériové elektromobily. Výpočty v štúdii sú však rozdelené na tri hlavné skupiny – recyklácia vozidla, recyklácia akumulátora a recyklácia gúm. Táto štúdia môže predstavovať základ pre úvahy oboch pohonov – ICE a BEV. Výsledkom štúdie sú zistenia, že na recykláciu vozidla je potrebných 13,15 GJ energie. Na recykláciu akumulátora je potrebných 2,58 GJ energie a na recykláciu gúm je potrebných 0,79 GJ energie [96]. V štúdii sa berie do úvahy priemerné elektrické vozidlo strednej veľkosti, ktorého hmotnosť nie je bližšie špecifikovaná. Približná hodnota energetickej náročnosti recyklácie vozidla Škoda Octavia III je 13,94 GJ a približná hodnota energetickej náročnosti recyklácie elektromobilu Tesla Model 3 je 16,52 GJ, pričom do výpočtov pre koniec životnosti vozidla je zahrnutá demontáž a drvenie komponentov a do výpočtov pre koniec životnosti akumulátora je zahrnutý proces predbežnej úpravy akumulátora (cieľom je oddeliť oceľ a medené prvky), namáčanie zvyšku akumulátora v hydroxide sodnom, zbavovanie sa nečistôt a následné spekanie.

FCEV

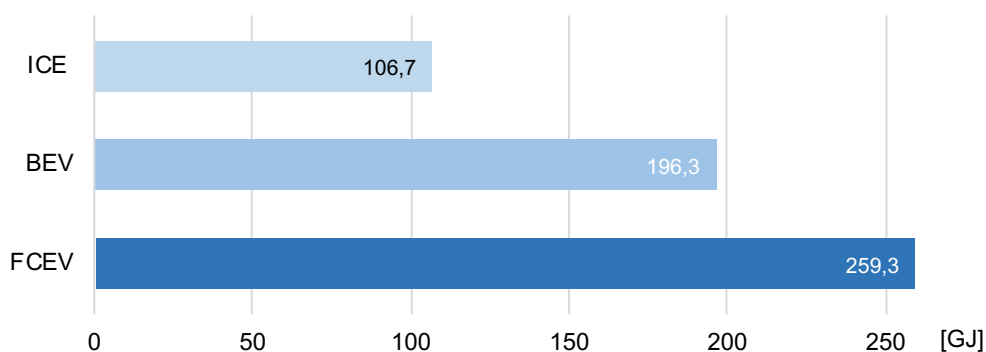
V prípade elektromobilov s palivovými článkami je situácia ešte zložitejšia. Recyklácia a opätovné použitie (pre nádrže na vodík) uhlíkového vlákna z kompozitných nádrží nie je možné, nakoľko regenerované uhlíkové vlákna majú nižšiu pevnosť v ťahu v porovnaní s pôvodnými vláknami [97]. Nakoľko technológia s palivovými článkami v automobiloch je relatívne mladá, neexistuje množstvo štúdií zameraných na energetickú náročnosť pri likvidácii/recyklácii týchto vozidiel. Výsledky ojedinelých štúdií, ktoré zahŕňajú aj energetickú náročnosť likvidácie automobilov s palivovými článkami variujú od hodnôt 0,3 GJ ako v štúdii [98], až po hodnoty 73,65 GJ ako v štúdii [99]. Preto som sa rozhodol tento rozptyl vyrovnať a v porovnávacích grafoch v kapitole 3.4 sa vyskytuje aritmetický priemer z predstavených dvoch štúdií, z toho vyplýva, že energetická náročnosť likvidácie a recyklácie vozidla Toyoty Mirai je 36,98 GJ.

3.4 POROVNANIE POHONOV

Porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti vyplýva z hodnôt získaných v predchádzajúcich kapitolách. Hodnoty vyplývajú zo štúdií zameraných na konkrétne obdobie života vozidla.

VÝROBA

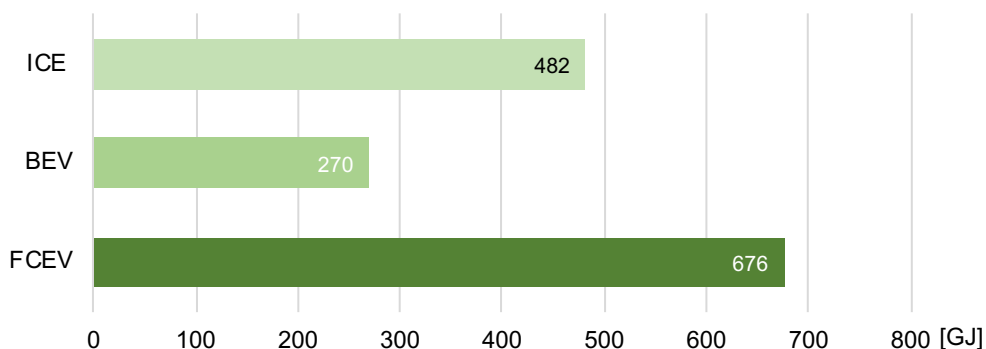
Grafické znázornenie hodnôt na Obr. 3.7 poukazuje na fakt, že najnižšia hodnota energie potrebnej na výrobu vozidla, je dosiahnutá v prípade ICE, pričom táto hodnota je približne 106,7 GJ. Výroba BEV vyžaduje takmer o 84 % energie viac v porovnaní s ICE a výroba FCEV vyžaduje o 143 % viac energie v porovnaní s ICE.



Obr. 3.7 Porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti pri výrobe

PREVÁDZKA

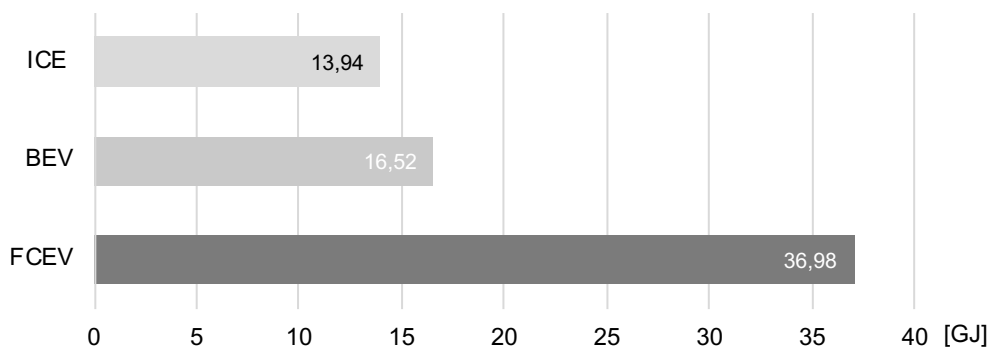
Energeticky najúspornejším zo všetkých troch pohonov, v prípade obdobia prevádzky, je pohon batériových elektromobilov, kedy je dosiahnutá hodnota 270 GJ. Vyplýva to z vysokej efektivity transportu a uskladňovania nosiča energie (elektriny), ako aj z vysokej efektivity pohonu (celková efektívnosť okolo 77 %) [100]. Naopak najviac energie je potrebnej počas prevádzky FCEV, v porovnaní s BEV je to o viac ako 150 %. Pre prevádzku ICE, je potrebných 79 % energie viac ako v prípade BEV. Hodnoty sú graficky znázornené na Obr. 3.8.



Obr. 3.8 Porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti pri prevádzke

KONIEC ŽIVOTNOSTI

Fáza konca životnosti vozidla je najzložitejším obdobím na overenie dôveryhodnosti získaných hodnôt. ICE sú do veľkej miery recyklované, pričom proces konca života vozidla sa častokrát odohráva na auto-vrakoviskách, kde je náročné dopátrať celkovú energetickú náročnosť. V prípade BEV, energetická náročnosť tejto fázy života vozidla do veľkej miery závisí, či sa akumulátor využije na sekundárne použitie alebo či bude zlikvidovaný. V prípade FCEV je otázka recyklácie a bezpečnej likvidácie stále v začiatkoch, čoho dôkazom je nedostatok štúdií zameraných na túto problematiku. Na Obr. 3.9 je graficky znázornené porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti počas konca životnosti.

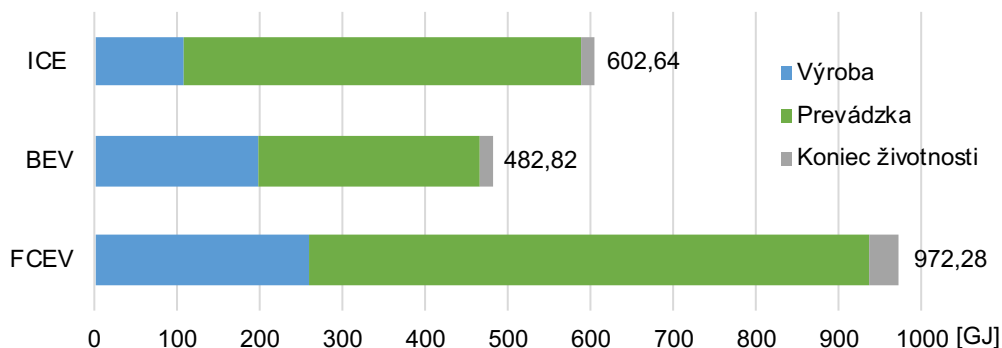


Obr. 3.9 Porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti pri likvidácii/recyklácii

ŽIVOTNÝ CYKLUS

Životný cyklus vozidla zahŕňa všetky obdobia vozidla – výrobu, prevádzku a koniec životnosti každého z pohonov. Energeticky najúspornejším pohonom je BEV, ktorý za svoju životnosť spotrebuje 482,82 GJ. V porovnaní s ICE je to o skoro 120 GJ energie menej – životný cyklus ICE vyžaduje 602,64 GJ energie. Najhoršie je na tom pohon FCEV, ktorý na svoj životný cyklus potrebuje 972,28 GJ energie, čo je o 101 % viac energie ako v prípade BEV.

Na Obr. 3.10 je grafické porovnanie životných cyklov pohonov, pričom je viditeľný rozdiel hlavne v prípade FCEV a ich energetickej náročnosti počas prevádzky.



Obr. 3.10 Porovnanie pohonov z hľadiska energetickej náročnosti počas celého životného cyklu

4 APLIKÁCIA LCA ANALÝZY

Nasledujúca kapitola je zameraná na praktickú aplikáciu LCA analýzy na osobné vozidlo, ktorá obsahuje 4 hlavné fázy, ako bolo opísané v kapitole 1.3. Osobné vozidlo, na ktoré bola aplikovaná analýza je predstavené v nasledujúcej podkapitole. Modelovanie produktového systému bolo realizované pomocou špecializovaného databázového softwaru openLCA, s platenou databázou ecoinvent 3.8, pričom za metodiku posudzovania environmentálnych vplyvov (LCIA) bola vybraná metodika Environmental Footprint (EF v3.0). Automobil bol pred demontážou pomyselne rozdelený na 3 hlavné celky – interiér, karoséria a motorová časť, pričom cieľom bolo získanie materiálového zloženia jednotlivých komponentov nachádzajúcich sa v týchto celkoch. Plán bol odvážiť vozidlo na začiatku dekompozície, kompletne demontovať interiér, následne demontovať čím najviac komponentov v motorovej časti aby bolo možné oddeliť a vytriahnuť motor spolu s prevodovkou z vozidla. Tým vzniklo vozidlo zložené len z karosérie, ktorú bolo možné odvážiť. Hmotnosť bola zapisovaná nasledujúcim materiálom: PC, ASA, PUR, PP, PE, PA, PES, PVC, ABS, POM, PMMA, EPDM, HDPE, PBT, PET, PU, PS/EPS, oceľ, železo, meď, hliník, zinok, textília, koža, sklo, drevo, guma.

4.1 DEFINÍCIA CIEĽOV A ROZSAHU

Automobil, na ktorom mi bolo umožnené aplikovať metódu posudzovania životného cyklu výrobku, predstavuje typ vozidla, ktoré obsahuje spaľovací motor. Konkrétne sa jedná o vozidlo značky Škoda Octavia Combi, tretej generácie s objemom motora 1,8 litra a výkonom 132 kW.



Obr. 4.1 Škoda Octavia 1,8 TSI/132 kW - pred demontážou

Jedná sa o automobil z predsériovej výroby, ktorý bol určený na vedecké účely a výuku študentov univerzity Vysokého učení technického v Brne. História tohto modelu siaha do roku 1996, kedy bola predstavená Octavia prvej generácie. Tretia

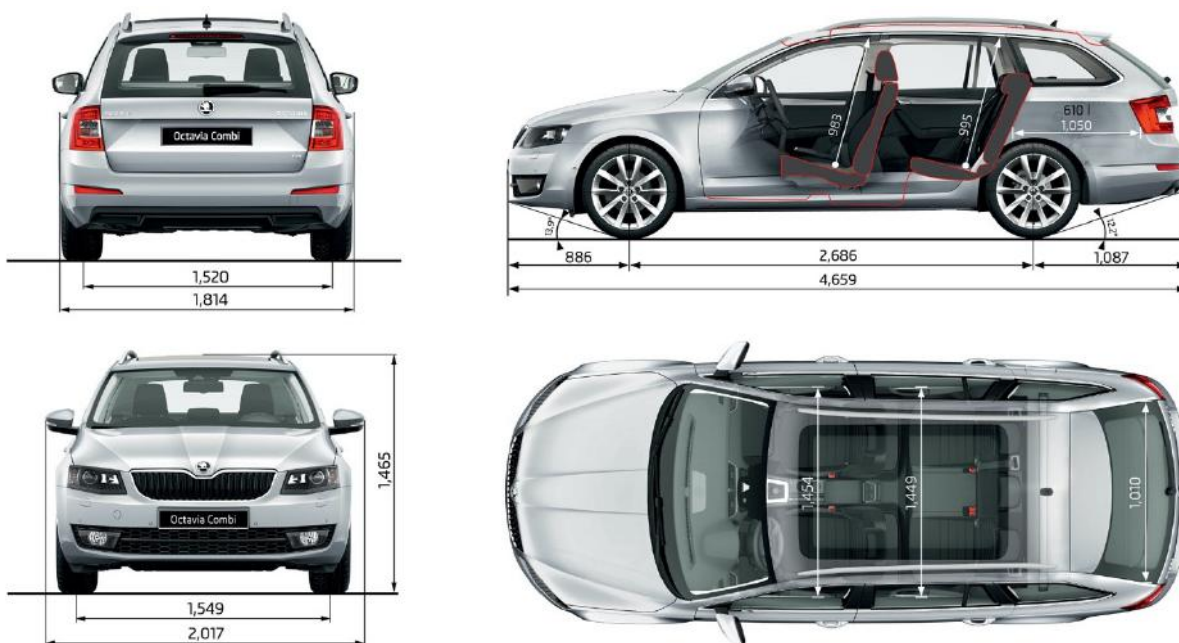
generácia sa objavila na sklonku roka 2012, v roku 2017 prešla faceliftom. V dnešnej dobe je k dispozícii štvrtá generácia Octavie [70].

Tento automobil síce slúžil študentom a počet celkových najazdených kilometrov nepresiahol 5 000 km, v analýze sa však bude počítať s priemerným počtom najazdených kilometrov za rok a životnosťou vozidla ako to bolo opísané v kapitole 3.2 – 200 000 km a 15 rokov prevádzky.

4.1.1 CIEĽ

Cieľom je demonštrácia zjednodušenej aplikácie metódy LCA pre vozidlo Škoda Octavia III, pričom získané dáta budú následne porovnávané so zisteniami uvedenými v kapitole 3.

Hlavným príjemcom tento štúdie je odborná verejnosť a predovšetkým sektor výskumu – napr. Centrum dopravného výskumu, ktoré predstavuje verejnú výskumnú inštitúciu a jedinú vedeckovýskumnú organizáciu v oblasti dopravy patriacu pod ministerstvo dopravy. Ďalšími príjemcami štúdie môžu byť neziskové organizácie, médiá, štátne správy atď.



Obr. 4.2 Technické parametre vozidla Octavia III, údaje sú uvedené v mm [102]

4.1.2 ROZSAH

Z hľadiska definície rozsahu je dôležité určenie funkcie produktu – funkciu automobilu Škoda Octavia III je doprava osôb pre každodenné účely, napr. pri dochádzaní do práce. Počet najazdených kilometrov neprevyšuje hodnotu 13 333 km/rok, čo v priemere znamená približne 37 km/deň. Za 15 rokov života vozidlo prejde približne 200 000 km.

Funkčnou jednotkou použitou v štúdii je funkcia 200 000 km najazdených predstaveným vozidlom, pričom hranice analýzy obsahujú celý životný cyklus produktu - „od kolísky do hrobu“, zahŕňajúc výrobu, prevádzku a likvidáciu/

recykláciu vozidla. Spájanie výrobných procesov, preprava počas výroby a údržba vozidla sú za hranicami systému, tzn., že sú z posúdenia vylúčené, nakoľko ich vplyv je zanedbateľný na celkový životný cyklus.

4.1.3 VOĽBA KATEGÓRIÍ DOPADU

Nakoľko rešeršná časť práce bola zameraná len na energetickú náročnosť jednotlivých fáz života automobilu, výpočet LCA je zameraný takisto na výpočet energie potrebnej v jednotlivých fázach – konkrétne čerpanie neobnoviteľných zdrojov. Táto kategória dopadu je jedna z mnohých, na ktoré je možné sa zamerať počas aplikácie LCA analýzy. Iné kategórie dopadu sú napríklad: acidifikácia, klimatické zmeny, ekotoxicita, eutrofizácia, ľudská toxicita, narúšanie ozónovej diery alebo vznik prachových častíc.

4.2 INVENTARIZÁCIA ŽIVOTNÉHO CYKLU

Ako bolo opísané v kapitole 1.3.2, inventarizácia pozostáva zo zberu a spracovania dát. Väčšinový podiel dát bol získaný fyzickou demontážou vozidla na jednotlivé diely, ktoré boli vážené na digitálnej váhe s presnosťou ± 5 g, pričom bola zapisovaná ich hmotnosť a materiálové zloženie. Celková hmotnosť automobilu bola meraná pomocou automobilovej váhy, ako je zobrazené na Obr. 4.3. Celý proces kompletnej dekompozície vozidla za účelom získania materiálového zloženia začal 27. júla 2022. V tom čase bolo vozidlo pojazdné a plne funkčné. Pred zahájením dekompozície bola zmeraná hmotnosť vozidla – 1324 kg, pričom nádrž bola naplnená benzínom do štvrtiny jej objemu.



Obr. 4.3 Meranie celkovej hmotnosti vozidla pred zahájením dekompozície

Prvou fázou dekompozície bola demontáž interiéru. Demontáž výplne predných dverí, demontáž sedadla, demontáž vonkajšieho spätného zrkadla, stredového

panelu, zadných sedadiel, stropnice (panelový strop), obloženie všetkých stĺpikov atď.

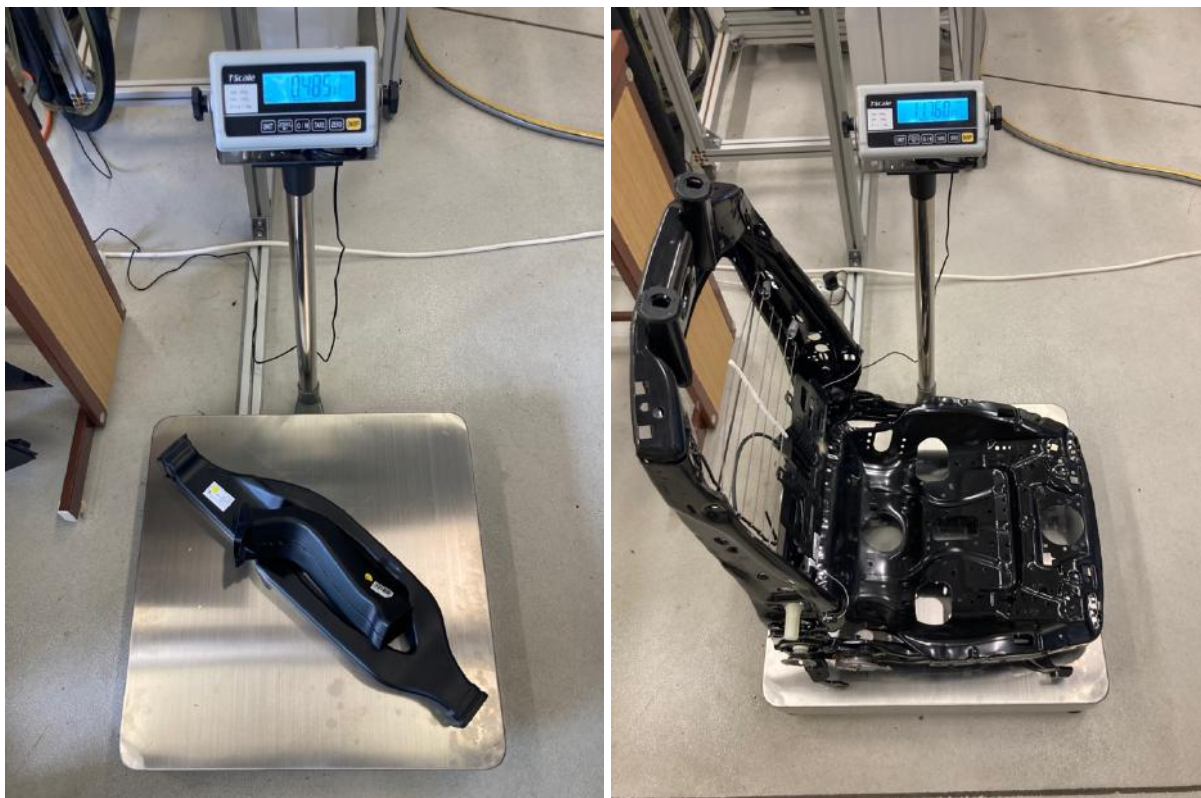


Obr. 4.4 Priebeh dekompozície interiéru vozidla

Nasledovala demontáž prístrojovej dosky, kvôli čomu bolo potrebné demontovať volant so stĺpikom riadenia, kolenný airbag, infotainment, rozvádzače vzduchu do kabíny, tlačidlá pre ovládanie klimatizácie atď.



Obr. 4.5 Proces demontáže prístrojovej dosky



Obr. 4.6 Príklad merania hmotnosti dielov na digitálnej váhe

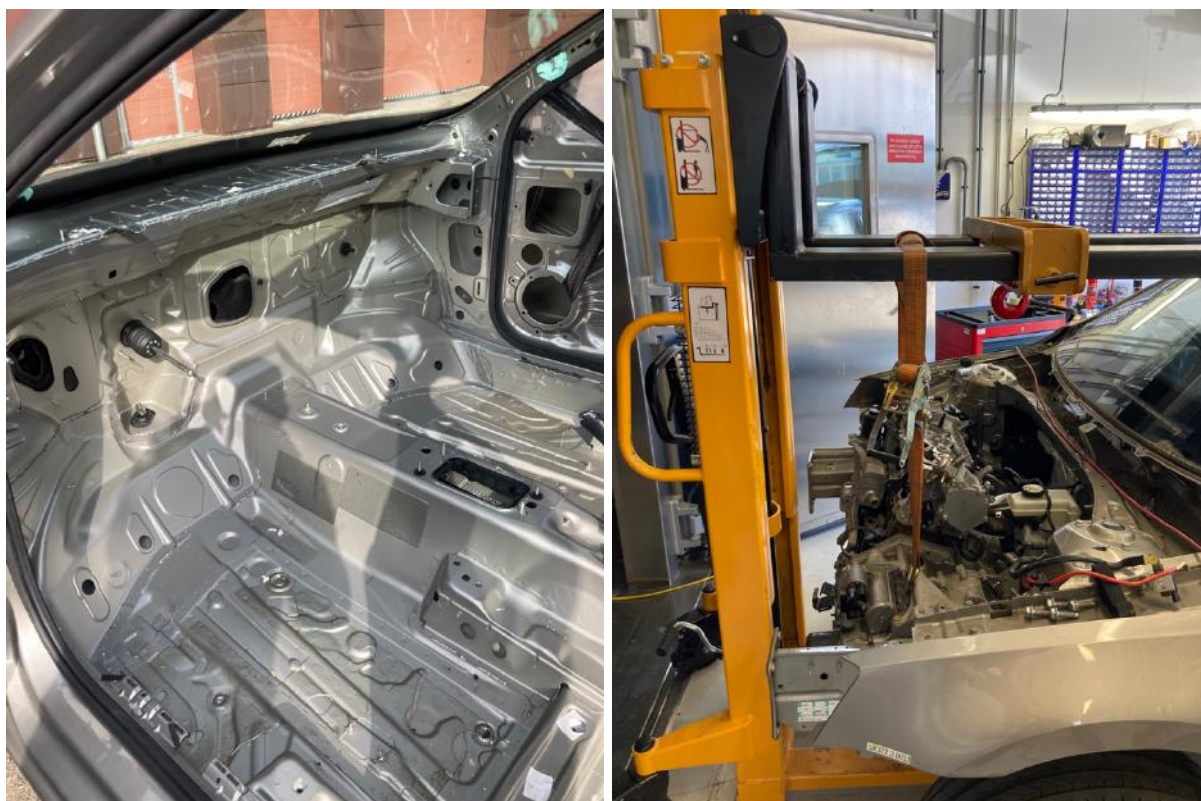
Všetky komponenty boli demontované na čo najzákladnejšie diely ako je to zobrazené na Obr. 4.6. Nasledovala kompletná demontáž predných a zadných dverí, výsledkom čoho bolo zistenie, že samotné predné dvere vážia 13,465 kg a zadné dvere 11,520 kg (Obr. 4.7). Sklo v predných dverách váži 3,055 kg a sklo v zadných dverách váži 2,220 kg.

V tom čase sa v kabíne vozidla nachádzala ešte klimatizačná jednotka, ktorá bola demontovaná po riadenom vypustení chladiva zo systému. Následne bol z kabíny vybraný poťahový koberec spolu s izolačnou vrstvou pre zníženie hluku v kabíne od vozovky. Bolo zvážené aj koleso vozidla – samostatne disk a guma. Guma s rozmermi 225/45 R17 má hmotnosť 8,805 kg, a hliníkový disk má hmotnosť 11,030 kg. Nasledovala demontáž motorovej časti s cieľom odstrojiť tento priestor natoľko, aby bolo možné oddeliť motor s prevodovkou od karosérie. Na začiatku bolo nutné demontovať kondenzátor s ventilátorom, následne menšie komponenty ako vzduchový filter, rôzne hadice, káblové zväzky, kompresor chladiva pre klimatizáciu, alternátor, turbodúchadlo, nasávanie vzduchu atď. Čiastočne bol demontovaný výfukový systém a bola demontovaná nádrž vozidla. Pred oddelením motora s prevodovkou od karosérie vozidla, bolo nutné oddeliť poloosy od prevodovky. Vozidlo bolo umiestnené opäť na váhy, pričom bola odmeraná hmotnosť pred a po oddelení motora s prevodovkou. Hmotnosť motora 1,8 TSI (CJSA) s prevodovkou 0CW-DSG je 199 kg.

Počas zberu dát bola zameraná hmotnosť 202 rôznych komponentov, pozri zoznam príloh.



Obr. 4.7 Meranie hmotnosti predných dverí a skla predných dverí



Obr. 4.8 Detailný pohľad na prednú časť kabíny a proces oddelenia motora s prevodovkou od vozidla



Obr. 4.9 Interiér vozidla na konci dekompozície

4.2.1 MODELOVANIE PRODUKTOVÉHO SYSTÉMU

Spracovanie získaných dát následne prebiehalo v softwari openLCA. Získané informácie o materiálovom zložení vozidla boli vložené do systému, pričom každému materiálu bola priradená hmotnosť. Ako bolo opísané na začiatku tejto kapitoly, LCA bola vyprodukovaná pomocou databázy ecoinvent 3.8, pričom Environmental Footprint bola vybraná za metodiku posudzovania environmentálnych vplyvov. Bol vybraný variant cradle-to-grave a vo výpočtoch sú zahrnuté všetky životné fázy vozidla – od ťažby nerastných surovín potrebných pre výrobu komponentov, prevádzku až do likvidácie, respektíve recykláciu vozidla. Hranice systému boli určené nasledovne:

- **obdobie výroby:** mimo hraníc systému sú výrobné procesy spojené s výrobou konkrétnych komponentov, transport komponentov do výrobného závodu automobilovej spoločnosti, energia potrebná pri výrobe vozidla
- **obdobie prevádzky:** mimo hraníc systému sú prevádzkové náklady vozidla (údržba a servis)
- **obdobie konca životnosti:** mimo hraníc systému sú transport a likvidácia niektorých materiálov, ako to je zobrazené v Tab. 4.1, pričom bolo počítané s 90 % recykláciou vozidla a všetky plasty reprezentujú 3 skupiny – PP, PE a PET

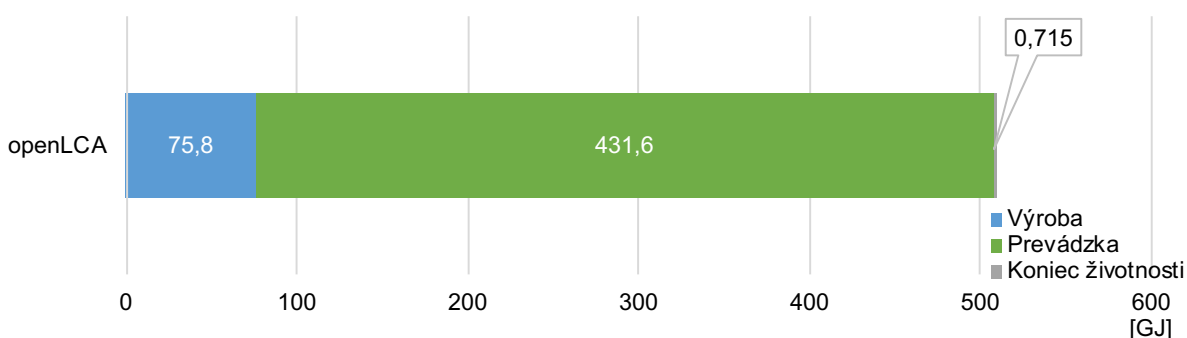
Obdržané výsledky sú znázornené v inventarizačnej Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Inventarizačná tabuľka životného cyklu vozidla Škoda Octavia III

Elementárny tok	Jednotka	Výroba	Prevádzka	Odstránenie	
PC	MJ	517,683	431566	-	
ASA	MJ	72,872		-	
guma	MJ	3146,360		13,672	
železo	MJ	3853,990		-	
textília	MJ	106,804		-	
PUR	MJ	1287,450		-	
PP	MJ	4770,200		32,805	
PE	MJ	1246,960		315,482	
PA	MJ	1716,610		-	
PES	MJ	221,683		-	
PVC	MJ	339,734		-	
ABS	MJ	396,965		-	
PMMA	MJ	73,606		-	
hliník	MJ	11700,100		115,406	
EPDM	MJ	2418,240		-	
HDPE	MJ	2030,560		-	
meď	MJ	250,159		13,603	
PET	MJ	382,557		19,165	
zinok	MJ	57,249		1,286	
sklo	MJ	5,709		5,597	
oceľ	MJ	35602,600		190,803	
PS/EPS	MJ	284,772		-	
drevo	MJ	55,913		-	
PU	MJ	703,880		6,742	
iné	MJ	4605,580		0,093	
súčet	GJ	75,848		431,566	0,715

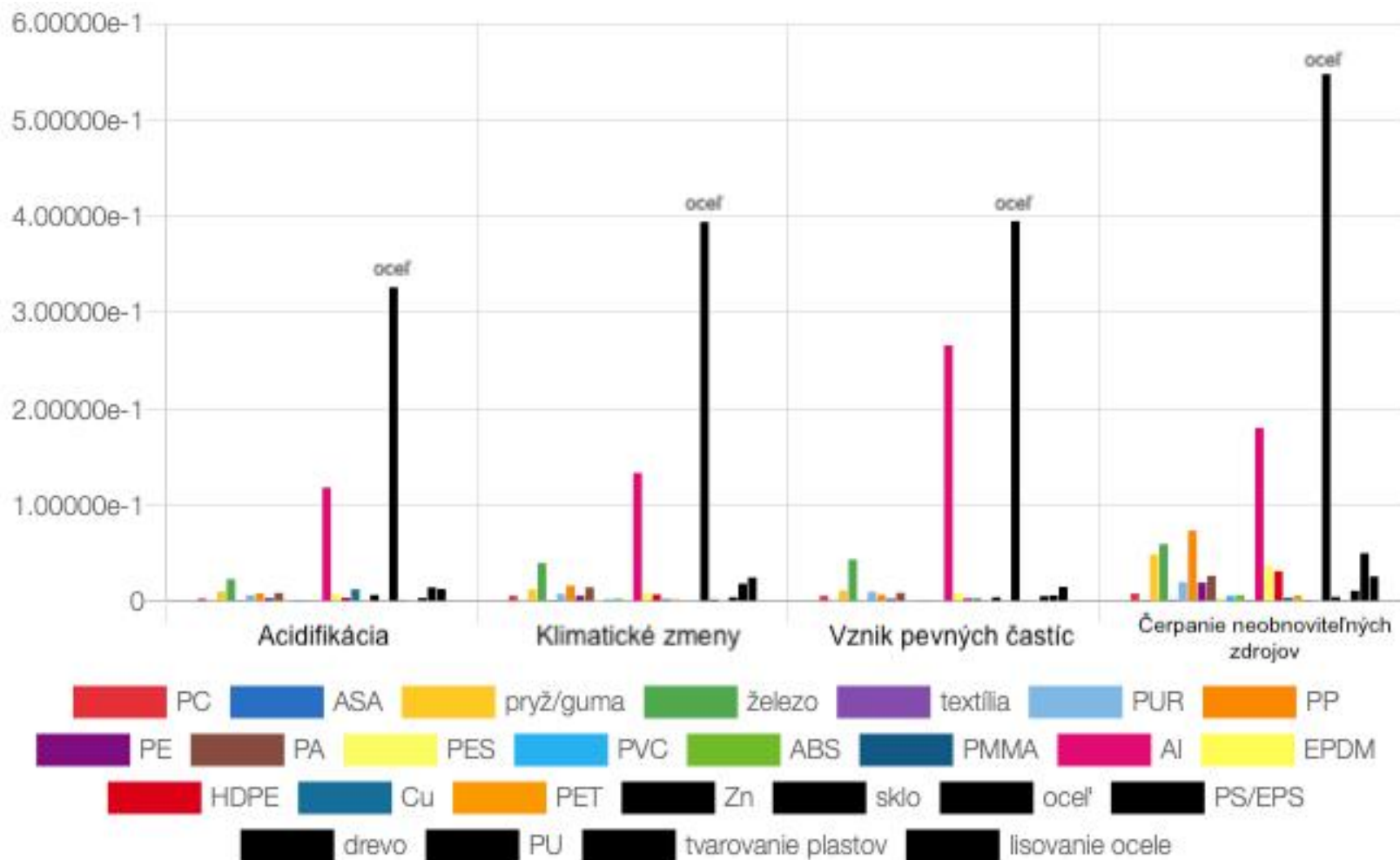
4.3 HODNOTENIE VPLYVOV ŽIVOTNÉHO CYKLU

Z výsledkov z Obr. 4.10 vyplýva, že energeticky najnáročnejšia fáza vozidla Škoda Octavia III je obdobie prevádzky, ktorému patrí hodnota 431,6 GJ energie. Naopak najmenej náročná fáza tohto automobilu je likvidácia/recyklácia, kedy je potrebných 0,715 GJ. Obdobie výroby vozidla Škoda Octavia III vyžaduje podľa výsledkov obdržaných zo softwaru 75,8 GJ.



Obr. 4.10 Výsledky LCA získané pomocou softwaru openLCA, vplyv na kategóriu čerpania neobnoviteľných zdrojov [GJ]

Pre posúdenie životného cyklu bola vybraná kategória čerpania neobnoviteľných zdrojov s hodnotami v MJ. Príklad normalizácie výsledkov (vzťahnutie výsledkov k referenčnej hodnote) je graficky znázornené na Obr. 4.11, kde je možné pozorovať vplyv viacerých kategórií (acidifikácia, klimatické zmeny, vznik pevných častíc a čerpanie neobnoviteľných zdrojov) na životné prostredie v priebehu výroby vozidla.



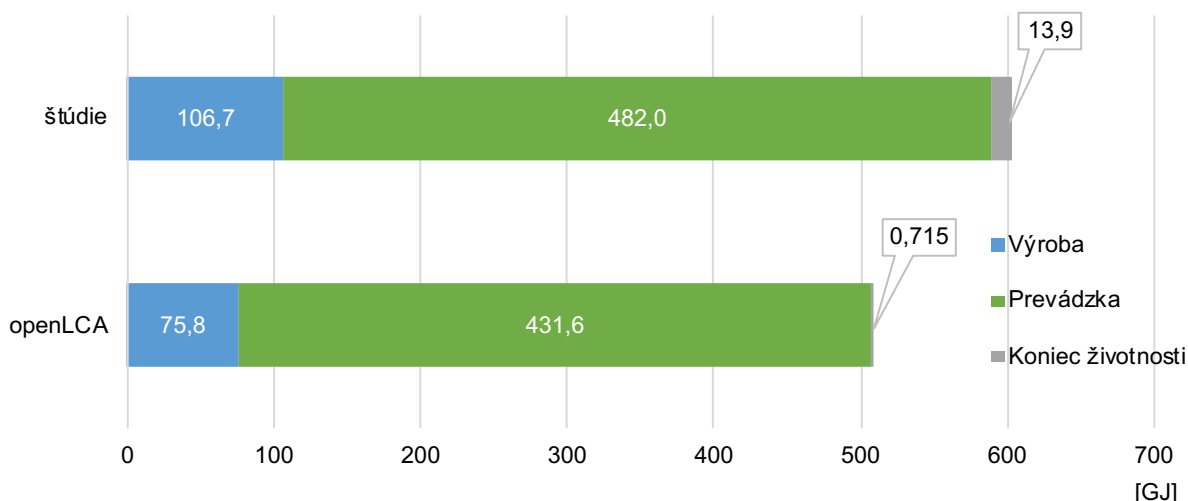
Obr. 4.11 Normalizačný graf - výroba vozidla Škoda Octavia III, jeden z možných grafických výsledkov softwaru openLCA – hodnoty sú v grafe radené postupne po riadkoch ako sú písané v legende, pričom najvyššiu hodnotu dosahuje výroba ocele

4.4 INTERPRETÁCIA ŽIVOTNÉHO CYKLU

Vypracovanie LCA analýzy pre vozidlo Škoda Octavia III prinieslo významné zistenia, hlavne v prvej fáze života vozidla. Najväčší podiel na spotrebe energie pri výrobe si vyžaduje spracovanie kovov – ich ťažba a následné spracovanie. Spracovanie ocele a hliníka tvorí 62,4 % energie spotrebovanej pri výrobe vozidla. Z toho vyplýva aj najväčší podiel skleníkových plynov vypustených do ovzdušia, ktorý je v prípade týchto dvoch kovov dokopy 4 269 kg CO₂ ekv. Ďalším dôležitým zistením je nepresnosť výsledkov v prípade konca životnosti vozidla v štúdiách a vo výpočtoch v softwari openLCA. Stále to môže byť spôsobené variabilnými procesmi pri likvidácii/recyklácii, ktoré sa častokrát menia od miesta a spôsobu likvidácie vozidla. V prípade nadväznosti v tejto LCA analýze je odporúčané zameranie sa na technologické procesy v období výroby komponentov a montáže vozidla, poprípade zameranie sa na koniec životnosti konkrétneho vozidla.

4.5 POROVNANIE VÝSLEDKOV

Táto kapitola obsahuje porovnanie výsledkov obdržaných z vedeckých štúdií v teoretickej časti práce a výsledkov obdržaných zo softwaru openLCA v praktickej časti práce. Grafické znázornenie porovnania výsledkov je na Obr. 4.12.



Obr. 4.12 Porovnanie výsledkov získaných teoreticky z vedeckých štúdií a praktickou prácou v openLCA

Ako bolo predstavené v kapitole 3.4, energetická náročnosť životného cyklu vozidla Škoda Octavia III je 602,64 GJ. Praktická aplikácia zozbieraných dát v softwari openLCA ukázala, že na životný cyklus vozidla Škoda Octavia III je potrebných 508,12 GJ. Ako je znázornené na Obr. 4.12, fáza výroby vozidla bola softwarom openLCA vypočítaná na hodnotu 75,8 GJ. Rozdiel medzi energetickou náročnosťou výroby vypočítanou teoreticky z publikovaných štúdií a hodnotou získanou zo softwaru je 30,9 GJ, čo môže byť spôsobené tým, že do výpočtov v softwari neboli zahrnuté všetky technologické procesy ako bolo opísané v kapitole 4.2.1. Hodnota 50,4 GJ energie predstavuje rozdiel medzi teoreticky vypočítanou hodnotou prevádzky vozidla a hodnotou získanou zo softwaru. Koniec životnosti vozidla predstavuje hodnoty s najväčším rozptylom, avšak nepresnosť možných výpočtov bola opísaná v kapitole 4.4.

ZÁVER

Diplomová práca bola zameraná na porovnanie životných cyklov viacerých typov pohonov vozidiel z pohľadu energetickej náročnosti. Predmetom skúmania boli automobily so spaľovacím motorom, batériové elektromobily a elektromobily s palivovými článkami. Táto diplomová práca čiastočne nadväzovala na bakalársku prácu, ktorú som vypracoval na tému „Vodík vs. elektrina – porovnaní energetickej náročnosti pohonů pro EV vozidla“.

V úvode tejto diplomovej práce bola predstavená metóda posudzovania životného cyklu výrobku – LCA (z angl. life cycle assessment), jej história, štyri hlavné fázy a rešerš súčasných metodík posudzovania environmentálnych vplyvov – LCIA (z angl. life cycle impact assessment), ktoré sa používajú v inventarizačnej fáze analýzy. Táto kapitola prináša všeobecný prehľad o metóde a hlavne vysvetľuje rozdiely jednotlivých metodík, ktoré sa navzájom líšia. Druhá kapitola diplomovej práce prináša prehľad o hlavných konštrukčných celkoch jednotlivých pohonov. V kapitole je bližšie opísaný rozbor konštrukcie a technologické procesy pri výrobe spaľovacieho motora a prevodovky, ktoré reprezentujú hlavné konštrukčné celky automobilu so spaľovacím motorom, takisto rozbor konštrukcie a technologické procesy elektromotora a akumulátora, charakterizujúce batériový elektromobil, pričom rozbor konštrukcie palivového článku a sústavy pre skladovanie vodíka sú opísané k záveru tejto kapitoly. Ďalšia kapitola práce je zameraná na energetickú náročnosť jednotlivých pohonov. Cieľom bolo upresniť postupy výpočtov výroby, prevádzky a likvidácie vozidiel každého z pohonov, pričom základ výpočtov bol založený na preštudovaní zverejnených vedeckých štúdií. Kapitola potvrdila hypotézu o tom, že výroba batériového elektromobilu je energeticky náročnejšia ako výroba automobilu so spaľovacím motorom a taktiež potvrdila hypotézu o tom, že prevádzkovať batériový elektromobil je energeticky najvýhodnejšia forma mobility (spomedzi predstavených pohonov).

Posledná kapitola práce patrí demonštrácii metódy na vozidlo so spaľovacím motorom - Škoda Octavia III. Vypracovaniu tejto kapitoly predchádzala demontáž spomenutého vozidla, za účelom získania materiálového zloženia a hmotnosti jednotlivých komponentov. Získané dáta slúžili ako podklad pre vypracovanie analýzy v softwari s názvom openLCA. V závere tejto kapitoly je grafické porovnanie výsledkov získaných zo softwaru a výsledkov získaných z vedeckých štúdií. Vedecké štúdie, ktoré boli podkladom pre teoretickú časť práce vždy generalizovali vozidlo za účelom poskytnutia čo najobjektívnejších výsledkov. Výsledky získané zo softwaru openLCA sú konkrétnymi a presnejšími výsledkami pre vozidlo Škoda Octavia III, nakoľko došlo k dôkladnej analýze materiálového zloženia vozidla. Podľa vedeckých štúdií je potrebných 106,7 GJ energie na výrobu automobilu so spaľovacím motorom, avšak hodnota energetickej náročnosti výroby vozidla Škoda Octavia III je podľa výpočtov z openLCA 75,8 GJ, čo je takmer o 29 % menej energie ako je uvádzané vo vedeckých štúdiách.¹¹ Ak by sme porovnali výsledky energetickej náročnosti životného cyklu pre vozidlo Škoda Octavia III (602,64 GJ) s výsledkami pre vozidlo

¹¹ Energetická náročnosť vozidla Škoda Octavia III, vypočítaná v openLCA môže dosiahnuť vyššie hodnoty po započítaní všetkých technologických procesov počas výroby vozidla.

Tesla Model 3 SR+ (482,82 GJ), rozdiel by bol 25,3 GJ v prospech batériového elektromobilu, čo predstavuje takmer 20% úsporu energie. Výsledkom diplomovej práce je zistenie, že energeticky najúspornejší je z pohľadu celého životného cyklu pohon batériových elektromobilov.

Viac ako 100-ročná história vývoja spaľovacieho motora je na technologickom vrchole, pričom začiatky vývoja moderných elektromobilov siahajú do nedávnej minulosti, z čoho vyplýva prirodzený postup v technologickom vývoji do nasledujúcich rokov. Predpokladá sa tiež s prechodom výroby elektriny z fosílnych palív na obnoviteľné zdroje, čo robí z batériových elektromobilov vhodný typ pohonu. Elektromobily s palivovými článkami sú dobrou alternatívou, sekundujúcou batériovým elektromobilom, avšak netreba zabúdať na pôvod vyrobeného vodíka a množstvo konverzií znižujúcich efektivitu systému, ktoré sa v životnom cykle takéhoto vozidla nachádzajú.

Ďalším rozvojom tejto diplomovej práce môže byť aplikácia metódy posudzovania životného cyklu na batériový elektromobil a následná komparácia s automobilom so spaľovacím motorom. Ďalším rozšírením tejto práce, môže byť aplikácia metódy životného cyklu na vozidlo so spaľovacím motorom, kde do hraníc systému budú započítané všetky technologické postupy pri výrobe vozidla, pričom autor môže čerpať z dát (uvedených v zozname príloh) získaných demontážou vozidla Škoda Octavia III.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] A review of the European passenger car regulations: real driving emissions vs local air quality [online]. 2018. 2018 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: sciencedirect.com
- [2] WILLIAMS, Martin a Ray MINJARES. *A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards* [online]. 2016 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://theicct.org/publication/a-technical-summary-of-euro-6-vi-vehicle-emission-standards/>
- [3] *Technický týdeník: nad výhledem těžby lithia v Srbsku se smráká, zájem o cínoveckou rudu roste*. 2022. Praha: Business Media CZ, 2022. ISSN 0040-1064.
- [4] *Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle* [online]. In: . [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle>
- [5] COSTA, C.M., J.C. BARBOSA, R. GONÇALVES, H. CASTRO, F.J. Del CAMPO a S. LANCEROS-MÉNDEZ. Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials* [online]. 2021, **37**, 433-465 [cit. 2023-05-04]. ISSN 24058297. Dostupné z: doi:10.1016/j.ensm.2021.02.032
- [6] KOČÍ, Vladimír. *Environmentální dopady: Posuzování životního cyklu*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-858-0.
- [7] *ČSN EN ISO 14040: Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Zásady a osnova*. 2006.
- [8] *ČSN EN ISO 14044: Environmentální management – Posuzování životního cyklu – Požadavky a směrnice*. 2006.
- [9] STRÁNSKÁ, Zuzana. *Hodnocení přírodních a recyklovaných surovin a materiálů v budovách* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-10-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18375. Disertace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství.
- [10] Posudzovanie životného cyklu - LCA. In: *ENVI-PAK* [online]. Bratislava, 2023 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://envipak.sk/clanok/Posudzovanie-zivotneho-cyklu-LCA>
- [11] Life-cycle assessment. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment
- [12] Well to Wheels. *Energy Systems and Infrastructure Analysis* [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://greet.es.anl.gov/greet/gettingstarted/wtw.html>
- [13] LAURIN, Lise. Overview of LCA - History, Concept, and Methodology. *Encyclopedia of Sustainable Technologies* [online]. Kittery: EarthShift Global, 2017, s. 217-222 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489100582>
- [14] *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment*. Pensacola: SETAC, 1991. ISBN 1880611007.

- [15] BARE, Jane. Midpoints Versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2012, 5(6), 319-326 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: doi:10.1007/BF02978665
- [16] GABATHULER, Heinz. *The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA* [online]. In: . s. 187-194 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1065/lca2006.04.021
- [17] ALI IBRAHIM MENOUI, Karim. *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art* [online]. Lleida, 2011 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/45831>. Diplomová práca. Universitat de Lleida.
- [18] *Updated US and Canadian normalization factors for TRACI 2.1* [online]. In: . 2013, s. 1-19 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: doi:10.1007/s10098-013-0629-z
- [19] Abiotic component. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Abiotic_component
- [20] Soil acidification. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_acidification
- [21] Eutrophication. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eutrophication>
- [22] AMIR HAMZAH SHARAAI. Life cycle impact assessment (LCIA) using EDIP 97 method: An analysis of potential impact from potable water production. *Scientific Research and Essays* [online]. 2011, 6(27), 5658-5670 [cit. 2023-02-14]. ISSN 19922248. Dostupné z: doi:10.5897/SRE11.287
- [23] GOEDKOOP, Mark a Renilde SPRIENSMA. *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment* [online]. 3rd ed. Amersfoort, 2000 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/247848113_The_Eco-Indicator_99_A_Damage_Oriented_Method_for_Life_Cycle_Impact_Assessment
- [24] STEEN, Bengt, Chalmers a Tomas RYDBERG. *EPS weighting factors: version 2020d* [online]. Göteborg, 2020 [cit. 2023-02-11]. ISBN 978-91-7883-226-2. Dostupné z: <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/eps-weighting-factors---version-2020d.html>
- [25] Environmental Priority Strategies (EPS). In: *IVL Swedish Environmental Research Institute* [online]. Stockholm, 2020 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.ivl.se/english/ivl/our-offer/our-focus-areas/consumption-and-production/environmental-priority-strategies-eps.html>
- [26] *Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method* [online]. Bern: Federal Office for the Environment, 2013 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/economy-consumption/economy-and-consumption--publications/publications-economy-and-consumption/eco-factors-2015-scarcity.html>
- [27] JOLLIET, Olivier a et al. *IMPACT 2002+: User Guide* [online]. Lausanne, 2012 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: https://quantis.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf

- [28] JOLLIET, Olivier a et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2003, 8(6), 324-330 [cit. 2023-02-13]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/BF02978505
- [29] GOEDKOOPE, Mark a et al. *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level* [online]. Ministerstvo bývania, územného plánovania a životného prostredia, 2009 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: https://web.universiteitleiden.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf
- [30] HUIJBREGTS, M.A.J. a et al. *ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level* [online]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2016 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf
- [31] Environmental Footprint. In: https://commission.europa.eu/index_en [online]. 2023 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>
- [32] Electric motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor
- [33] RICHARDSON, Jake. ELECTRIC CARS: 38% Of American Cars Were Electric In 1900. In: <https://cleantechnica.com/> [online]. 2018 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2018/02/25/38-percent-american-cars-electric-1900/>
- [34] Throwback Comparison Test: Ford Model T vs. Detroit Electric Model 90 Coupe. In: *Motortrend* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/news/comparison-test-drive-review-ford-model-t-detroit-electric-model-90/>
- [35] Zákaz prodeje nových benzínových a naftových aut v EU od roku 2035: Co to znamená v praxi?. In: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs> [online]. 2022 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20221019STO44572/zakaz-prodeje-novych-benzinovych-a-naftovych-aut-od-roku-2035>
- [36] *How Many Parts Are in a Car?* [online]. In: . 2020 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://collectorsautosupply.com/blog/how-many-parts-are-in-a-car/#:~:text=The%20average%20car%20has%20roughly,of%20individual%20parts%20inside%20it.>
- [37] Kompresný pomer. In: *Autolexicon.net* [online]. 2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/sk/articles/kompresni-pomer/>
- [38] Teorie motoru 4. In: *Www.skoda-techweb.cz* [online]. 2003 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.skoda-techweb.cz/clanek.php?id=413>
- [39] HILVERT, Juraj. *Výkladový slovník automobilizmu*. Bratislava: DLX Slovakia, 2007. ISBN 978-80-900972-8-5.
- [40] ZATLOUKAL, Lukáš. *Odlehčení ojnice vznětového řadového čtyřválce* [online]. Brno, 2008 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5123. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního

- inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Novotný.
- [41] This is how a gearbox is made. In: SEAT S.A. [online]. 2017 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.seat-mediacent.com/storiespage/category/this-is-how-a-gearbox-is-made.html>
- [42] One in seven cars sold globally now is an EV. In: Quartz [online]. 2023 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://qz.com/one-in-seven-cars-sold-globally-now-is-an-ev-1850193842>
- [43] *Elektrické motory pre elektromobily* [online]. 4. [cit. 2023-03-28]. ISSN 2453-8981. Dostupné z: http://elektrotechnickelisty.eu/casopis/rocnik_IV/clanky/EL_2_2019.pdf
- [44] Thermal Management in Electric and Hybrid Vehicles. In: Hella [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.hella.com/techworld/au/Technical/Car-air-conditioning/Thermal-management-in-electric-and-hybrid-vehicles-1725/>
- [45] Electric motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor
- [46] BORDIANU, Adelina a Gheorghe SAMOILESCU. Analysis of Materials Used in the Construction of Electric Motors. In: *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION* [online]. 2019, s. 19-24 [cit. 2023-03-29]. ISSN 2451-3113. Dostupné z: doi:10.2478/kbo-2019-0111
- [47] Permanent magnet synchronous motor. In: *Engineering solutions* [online]. 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
- [48] Baghdad Battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Baghdad_Battery
- [49] Discovering the principle. In: *Panasonic Energy* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.panasonic.com/global/energy/study/academy/history.html>
- [50] Past, Present and Future of Lithium-Ion Batteries: Can New Technologies Open up New Horizons?. *Lithium-Ion Batteries* [online]. 2014, 21-39 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-59513-3.00002-9
- [51] *Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle* [online]. 2012 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: doi:10.2172/1044525
- [52] NELSON, P.A. *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles* [online]. Argonne, 2011 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/10/71302.pdf>
- [53] Tesla unveils new structural battery pack with 4680 cells in Gigafactory Berlin tour. In: *Electrek* [online]. 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://electrek.co/2021/10/10/tesla-unveils-new-structural-battery-pack-with-4680-cells-gigafactory-berlin/>
- [54] ŠÁNDOR, Kristián. *Vodík vs. elektřina - porovnání energetické náročnosti pohonů pro EV vozidla*. Brno, 2021. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.
- [55] HAILE, Sossina M. Fuel cell materials and components: Past, Present and Future, edited by S. Suresh. In: *Acta Materialia* [online]. 2003, s. 5981-6000

- [cit. 2023-03-30]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2003.08.004
- [56] TIAN, Kris. Raw Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In: *Design Life-Cycle* [online]. 2018 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <http://www.designlife-cycle.com/hydrogen-fuel-cell>
- [57] Hyundai Motor Group Presents Its Vision to Popularize Hydrogen by 2040 at Hydrogen Wave Forum. In: *Hyundai* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.hyundai.ps/hyundai-story/global-news/hyundai-motor-group-presents-its-vision-to-popularize-hydrogen-by-2040-at-hydrogen-wave-forum>
- [58] Vodíková energetika. In: *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/vodikova-energetika/vyklad>
- [59] Vodík: Nejlehčí prvek je největší výzva. In: *O energetice* [online]. 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vodik/vodik-nejlehci-prvek-nejvetsi-vyzva>
- [60] MCWHORTER, Scott a Grace ORDAZ. *Onboard Type IV Compressed Hydrogen Storage Systems: Current Performance and Cost* [online]. In: . [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13010_onboard_storage_performance_cost.pdf
- [61] What Makes Fuel Cell Electric Vehicles Safe?. In: *Hyundai Motor Group Tech* [online]. 6.9.2019 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/what-makes-the-fuel-cell-electric-vehicle-safe/>
- [62] RIVARD, Etienne, Michel TRUDEAU a Karim ZAGHIB. Hydrogen Storage for Mobility: A Review. In: *Materials* [online]. 2019 [cit. 2023-04-01]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12121973
- [63] Thermal Pressure Relief Device (TPRD). In: *Hyfindr* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/valves/thermal-pressure-relief-device/>
- [64] Energetická náročnost. In: *Energetika Info* [online]. 2018 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/energeticka-narocnost-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EIDzobldhBp5GEQHJMKbdqg/>
- [65] Statistika: Roční správa. In: *O TE* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocn-zprava?date=2022-01-01>
- [66] Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment in the Mobility Sector. In: *Science for a moving society* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.30_Bilanz_gezogen/FVV_LCA_Life-cycle_analysis_Frontier_Economics_R595_final_2020-06_EN.pdf
- [67] Environmentálne vplyvy fáz životného cyklu domov. In: *ASB* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/technicke-zariadenia-budov/energie/environmentalne-vplyvy-vybranych-faz-zivotneho-cyklu-rodinnych-domov>
- [68] SATO, Fernando Enzo Kenta a Toshihiko NAKATA. Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. *Energies* [online]. 2020, **13**(9) [cit. 2023-04-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13092396

- [69] SCHWEIMER, Georg W. a Marcel LEVIN. *Life Cycle Inventory for the Golf A4* [online]. In: . Wolfsburg: Research, Environment and Transport, Volkswagen AG, Center of Environmental Systems Research, University of Kassel, 2000 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf>
- [70] SULLIVAN, John Lorenzo. Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing. *Journal of Industrial Ecology* [online]. About Argonne National Laboratory, 2010, (17) [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: doi:10.2172/993394
- [71] Specifications and price. In: *EVSpecifications* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.evspecifications.com/en/model/4ab310f>
- [72] MUDROŇ, Miroslav. Na obzore má byť ďalšia prevratná technológia pre batérie bez kobaltu. In: *MôjElektromobil* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.mojelektromobil.sk/kombinacia-nikel-mangan-hlinik-bateria-bez-kobaltu/>
- [73] *Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey* [online]. U.S. Geological Survey, 2021 [cit. 2023-04-11]. ISBN 978-1-4113-4398-6. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- [74] Executive summary. In: *International Energy Agency* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>
- [75] TEMBO, Bernard. Modelling of Energy in Copper Mining Industry. In: *International Association for Energy Economics* [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.iaee.org/proceedings/article/13683>
- [76] JARA, Allah D., Girma WOLDETINSAE, Amha BETEMARIAM a Jung Yong KIM. Mineralogical and petrographic analysis on the flake graphite ore from Saba Boru area in Ethiopia. *International Journal of Mining Science and Technology* [online]. 2020, **30**(5), 715-721 [cit. 2023-04-11]. ISSN 20952686. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmst.2020.05.025
- [77] GAO, Si Wen, Xian Zheng GONG, Yu LIU a Qi Qi ZHANG. Energy Consumption and Carbon Emission Analysis of Natural Graphite Anode Material for Lithium Batteries. *Materials Science Forum* [online]. 2018, **913**, 985-990 [cit. 2023-04-11]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.913.985
- [78] ELLINGSEN, Linda Ager-Wick, Guillaume MAJEAU-BETTEZ, Bhawna SINGH, Akhilesh Kumar SRIVASTAVA, Lars Ole VALØEN a Anders Hammer STRØMMAN. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology* [online]. 2014, **18**(1), 113-124 [cit. 2023-04-13]. ISSN 10881980. Dostupné z: doi:10.1111/jiec.12072
- [79] Life Cycle Assessment Methodology and Data: Estimated Greenhouse Gas Emissions and Primary Energy Demand of Passenger Vehicles. In: *Green NCAP* [online]. 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.greenncap.com/wp-content/uploads/Green-NCAP-Life-Cycle-Assessment-Methodology-and-Data_2nd-edition.pdf
- [80] Life Cycle Assessment (LCA) Interactive Tool. *Green NCAP* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.greenncap.com/lca-tool/>
- [81] SAFARIAN, Sahar. Environmental and energy impacts of battery electric and conventional vehicles: A study in Sweden under recycling scenarios. *Fuel*

- Communications* [online]. 2023, **14** [cit. 2023-04-11]. ISSN 26660520. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfueco.2022.100083
- [82] Katalog Mirai. In: *Toyota* [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://pdf.sites.toyota.cz/mirai-katalog.pdf>
- [83] ZAMEL, Nada a Xianguo LI. Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, **155**(2), 297-310 [cit. 2023-04-15]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2005.04.024
- [84] *Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles* [online]. In: Didcot: Ricardo-AEA, 2015 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/ldv_mileage_improvement_en.pdf
- [85] Average age of passenger cars in some European countries. In: *Autoalan Tiedotuskeskus* [online]. Helsinki, 2022 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://www.aut.fi/en/statistics/international_statistics/average_age_of_passenger_cars_in_european_countries
- [86] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/33/ES: o podpoře čistých a energeticky účinných silničních vozidel*. In: . Úřední věstník Evropské unie, 2009. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:120:0005:0012:CS:PDF>
- [87] *TEST Škoda Octavia 1.8 TSI* [online]. In: . 2013 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/test-skoda-octavia-1-8-tsi-zavodnik-v-utajeni-75117>
- [88] PRUSSI, M., M. YUGO, L. DE PRADA a M. PADELLA. *JEC Well-To-Wheels report v5* [online]. Luxembursko: Úrad pre vydávanie publikácií Európskej únie, 2020 [cit. 2023-04-15]. ISBN 978-92-76-20109-0. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213>
- [89] PATSCH, Marek, Peter ĎURČANSKÝ, Alexander ČAJA a Peter PILÁT. *Palivá pre spaľovanie v energetických strojoch a zariadeniach* [online]. Žilina, 2022 [cit. 2023-05-12]. ISBN 978-80-973466-9-0. Dostupné z: [http://ket.uniza.sk/images/pdf/FINAL%20paliva%20a%20spalovanie%20v%20ESaZ%20-ISBN%20\(1\).pdf](http://ket.uniza.sk/images/pdf/FINAL%20paliva%20a%20spalovanie%20v%20ESaZ%20-ISBN%20(1).pdf)
- [90] Total energy supply, 2020. In: *International Energy Agency* [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.iea.org/regions/europe>
- [91] O vodíku. In: *Národná vodíková asociácia Slovenska* [online]. Bratislava [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://nvas.sk/o-vodiku/>
- [92] Gaseous Hydrogen Delivery. In: *Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-delivery>
- [93] BOSSEL, Ulf a Baldur ELIASSON. Energy and the Hydrogen Economy. In: *Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf
- [94] End-of-life vehicles. In: *EUR-Lex* [online]. Publications Office of the European Union [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/end-of-life-vehicles.html>
- [95] BOUREIMA, Fayçal-Siddikou, Maarten MESSAGIE, Julien MATHEYS, Vincent WYNEN, Nele SERGEANT, Joeri VAN MIERLO, Marc DE VOS a Bernard DE CAEVEL. Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline

- cars in Belgian context. In: *World Electric Vehicle Journal* [online]. 2009, s. 469-476 [cit. 2023-04-18]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj3030469
- [96] HAO, Han, Qinyu QIAO, Zongwei LIU a Fuquan ZHAO. Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2017, **122**, 114-125 [cit. 2023-04-19]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2017.02.005
- [97] MELENDI-ESPINA, Sonia. Recycling of Carbon Fibre Composites. In: *University of East Anglia* [online]. Norwich [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://ueaeprints.uea.ac.uk/id/eprint/59606/1/ExtendedAbstract_S.Melendi_Espina.pdf
- [98] HUSSAIN, M.M., I. DINCER a X. LI. A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2007, **27**(13), 2294-2299 [cit. 2023-04-24]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.01.015
- [99] YANG, Zijun, Bowen WANG a Kui JIAO. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. *Energy* [online]. 2020, **198** [cit. 2023-04-24]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2020.117365
- [100] Cars: direct electrification most efficient by far. In: *CleanTechnica* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/02/01/chart-why-battery-electric-vehicles-beat-hydrogen-electric-vehicles-without-breaking-a-sweat/>
- [101] Škoda Octavia. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_Octavia
- [102] MIHÁLIK, Miro. Nová Škoda Octavia III Combi a její 610 litrový „kufr“ v detailech. In: *Autoforum.cz* [online]. 2013 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/predstaveni/nova-skoda-octavia-iii-combi-a-jeji-610litrovy-kufr-v-detailech/>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

€	[-]	euro
ABS	[-]	akrylonitrilbutadiénstyrén
Ah	[-]	ampérhodina
AM	[-]	asynchrónny motor
atď.	[-]	a tak ďalej
B	[-]	bór
BEES	[-]	budovanie pre environmentálnu a ekonomickú udržateľnosť, z angl. Building for Environmental and Economic Sustainability
BEV	[-]	batériový elektromobil, z angl. battery electric vehicle
CCS	[-]	technológia zachytávania oxidu uhličitého, z angl. carbon capture storage
CEENE	[-]	kumulatívna extrakcia exergie z prírodného prostredia, z angl. Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment
CML	[-]	Centrum environmentálnych vied Leiden, z angl. Centrum voor Milieukunde Leiden
Co	[-]	kobalt
CO ₂	[-]	oxid uhličitý
CO ₂ ekv.	[-]	oxid uhličitý ekvivalent
ČSN	[-]	Československá štátna norma
DC	[-]	jednosmerný prúd, z angl. direct current
DRC	[-]	Konžská demokratická republika, z angl. Democratic Republic of Congo
EDIP	[-]	environmentálny dizajn priemyselných výrobkov, z angl. Environmental Design of Industrial Products
EF	[-]	environmentálna stopa, z angl. Environmental footprint
ELU	[-]	jednotka environmentálnej záťaže, z angl. Environmental load unit
EN _{Al}	[MJ/kg]	priemerná energetická náročnosť odlievania hliníka
EPP	[-]	extrudovaný polypropylén
EPS	[-]	stratégie environmentálnych priorít pri navrhovaní výrobkov, z angl. Environmental Priority Strategies in product design
EÚ	[-]	Európska únia
EV	[-]	elektrický automobil, z angl. electric vehicle

<i>FCEV</i>	[-]	elektromobil s palivovými článkami, z angl. fuel cell electric vehicle
<i>Fe</i>	[-]	železo
<i>GJ</i>	[-]	gigajoule
<i>H</i>	[-]	vodík
<i>H₂</i>	[-]	molekula vodíka
<i>HEV</i>	[-]	hybridný elektromobil, z angl. hybrid electric vehicle
<i>ICE</i>	[-]	automobil so spaľovacím motorom, z angl. internal combustion engine
<i>IEA</i>	[-]	Medzinárodná energetická agentúra, z angl. International Energy Agency
<i>IPCC</i>	[-]	Medzivládny panel pre zmenu klímy, z angl. Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>JEPIX</i>	[-]	index priorít environmentálnej politiky Japonska, z angl. Japan Environmental Policy Priorities Index
<i>kg</i>	[-]	kilogram
<i>km</i>	[-]	kilometer
<i>kWh</i>	[-]	kilowatthodina
<i>LCA</i>	[-]	posúdenie životného cyklu, z angl. Life Cycle Assessment
<i>LCIA</i>	[-]	posúdenie vplyvu životného cyklu, z angl. Life Cycle Impact Assessment
<i>LFP</i>	[-]	kombinácia lítium-železo-fosfátu
<i>Li</i>	[-]	lítium
<i>Li⁺</i>	[-]	katión lítia
<i>LiFePO₄</i>	[-]	lítium-železo fosfát
<i>Li-ion</i>	[-]	lítium-iónový
<i>LIME</i>	[-]	metóda hodnotenia životného cyklu na základe endpointového modelu, z angl. Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modelling
<i>LiMn₂O₄</i>	[-]	manganistan lítny
<i>LUCAS</i>	[-]	metóda LCIA použitá v kontexte špecifickom pre Kanadu, z angl. LCIA method Used for a Canadian-Specific context
<i>m³</i>	[-]	meter kubický
<i>m_{HV}</i>	[kg]	hmotnosť hlavy valcov
<i>MJ</i>	[-]	megajoule
<i>mm</i>	[-]	milimeter

<i>MPa</i>	[-]	megapascal
<i>MWh</i>	[-]	megawatthodina
<i>napr.</i>	[-]	napríklad
<i>Nd</i>	[-]	neodým
<i>NMC</i>	[-]	kombinácia nikel-mangán-kobaltu
<i>OTE-ČR</i>	[-]	operátor trhu s elektrinou
<i>PE</i>	[-]	polyetylén
<i>PEMFC</i>	[-]	palivový článok s membránou pre výmenu protónov, z angl. proton exchange membrane fuel cells
<i>PET</i>	[-]	polyetyléntereftalát
<i>PHEV</i>	[-]	plug-in hybridný elektromobil, z angl. plug-in hybrid electric vehicle
<i>PMMA</i>	[-]	polymethylmethakrylát
<i>PMSM</i>	[-]	synchronný motor s permanentnými magnetmi, z angl. permanent magnet synchronous motor
<i>PP</i>	[-]	polypropylén
<i>PP-EPDM</i>	[-]	gumou modifikovaný polypropylén
<i>PU</i>	[-]	polyuretán
<i>REEV</i>	[-]	batériový elektromobil s predĺženým dojazdom, z angl. range extender electric vehicle
<i>REPA</i>	[-]	analýza zdrojov a environmentálneho profilu, z angl. Resource and Environmental Profile Analysis
<i>Sm</i>	[-]	samárrium
<i>TPRD</i>	[-]	tepelne aktivované zariadenia na uvoľnenie tlaku, z angl. thermal pressure relief device
<i>TRACI</i>	[-]	nástroj na znižovanie a hodnotenie chemických a iných vplyvov na životné prostredie, z angl. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts
<i>TSI</i>	[-]	priame vstrekovanie a variabilné časovanie nasávacích ventilov, z angl. twincharged stratified injection
<i>UBP</i>	[-]	eko-body, z angl. environmental loading points
<i>US EPA</i>	[-]	Agentúra pre ochranu životného prostredia, z angl. United States Environmental Protection Agency
<i>USGS</i>	[-]	Americký geologický výskum, z angl. United States Geological Survey
<i>V</i>	[-]	volt

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 – Demontáž vozidla

Príloha 2 – Materiálové zloženie