



# 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

## ELEKTRICKÝ POHON ZÁVODNÍCH VOZIDEL

RACE CARS ELECTRIC DRIVE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Nosek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Václav Nosek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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 bakalářské práce:

## **Elektrický pohon závodních vozidel**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pohon elektrickým motorem se prosazuje nejen v běžných osobních a nákladních vozidlech, ale také ve vozidlech závodních. Jedná se o vozidla čistě elektrická nebo různé typy hybridních pohonů. V některých případech je typ pohonu určen pravidly konkrétní disciplíny, v jiných je dán volbou konstruktéra.

### **Cíle bakalářské práce:**

Rešerše v oblasti využití elektrických pohonů v různých disciplínách automobilového sportu.  
Modelové porovnání různých konceptů elektrického pohonu v kategorii off-roadových vozidel.

### **Seznam doporučené literatury:**

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

FIJALKOVSKI, B. T. Automotive mechatronics: operational and practical issues. Dordrecht: Springer Verlag, 2011. 526 s. ISBN 978-94-007-1182-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kategoriemi motorsportu s vozidly využívajícími elektrický pohon. V teoretické části je nejprve zmíněna stručná historie elektrického pohonu a rozdělení jednotlivých typů elektrických vozů. Hlavní část poté rozebírá základní kategorie elektrického motorsportu a několik modelů se zaměřením na jejich technické specifikace. Praktická část práce věnuje pozornost komparaci konceptů v závodní kategorii T1. Zásadní důraz je zde kladen na ověření aktuálně dosažitelných schopností elektrického pohonu ve srovnání s ostatními způsoby využívanými v závodním prostředí dané kategorie.

## KLÍČOVÁ SLOVA

motorsport, elektrický pohon, závodní vozidlo, elektromotor, MGU, kategorie T1

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the categories of motorsport vehicles powered by electric drive. In the theoretical part, a brief history of electric drive and the classification of the different types of electric vehicles are first mentioned. The main part then discusses the main categories of electric motorsport and several models, focusing on their technical specifications. The practical part of the thesis focuses on the comparison of concepts in the T1 racing category. The main emphasis here is on verifying the currently achievable capabilities of electric drive compared to other methods used in the racing environment of the category.

## KEYWORDS

motorsport, electric drive, racing vehicle, electric motor, MGU, category T1

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOSEK, Václav. *Elektrický pohon závodních vozidel*. Online, Bakalářská práce. Brno: 2024 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Ondřej Blatňák. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157547>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Václav Nosek

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Ondřeji Blaťákovi, Ph.D. za odborné rady, konzultace a věnovaný čas který mi během vypracování poskytl. Zároveň bych rád poděkoval rodině za podporu skrze trvání celého studia i zpracování této práce.



# OBSAH

<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Elektrické vozidlo</b> .....	<b>11</b>
1.1 Historie a současnost elektrických vozidel.....	11
1.1.1 19.století .....	12
1.1.2 20.století .....	13
1.1.3 21.století .....	15
1.2 Typy elektromobilů .....	17
1.2.1 Battery Electric Vehicles (BEVs).....	17
1.2.2 Hybrid Electric Vehicles (HEVs).....	18
1.2.3 Plug-in Electric Vehicles (PHEVs) .....	18
1.2.4 Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs).....	19
<b>2 Kategorie elektrického motorsportu</b> .....	<b>21</b>
2.1 Formule E .....	21
2.1.1 Popis a vývoj Formule E .....	21
2.1.2 Technické specifikace závodního vozu .....	22
2.1.3 Formát závodu a pravidla .....	28
2.2 Extreme E .....	30
2.2.1 Popis a vývoj kategorie Extreme E .....	30
2.2.2 Technické specifikace závodního vozu .....	30
2.2.3 Formát závodu a pravidla .....	32
2.3 FIA World Rallycross Championship .....	34
2.3.1 Popis a vývoj kategorie WRX .....	34
2.3.2 Technické specifikace závodního vozu .....	34
2.3.3 Formát závodů a pravidla .....	38
2.4 Elektrické modely otevřených sérií .....	38
2.4.1 Volkswagen I.D. R Pikes Peak .....	38
2.4.2 Porsche 919 Hybrid .....	41
<b>3 Modelové porovnání konceptů v kategorii T1</b> .....	<b>44</b>
3.1 Popis kategorie T1 a omezení vozů .....	44
3.2 Technické parametry porovnávaných vozů .....	45
3.2.1 Vozidlo 1 – Toyota Hilux Dakar EVO .....	45
3.2.2 Vozidlo 2 – Peugeot 3008 DKR Maxi.....	46
3.2.3 Vozidlo 3 – Audi RS Q e-tron .....	47
3.2.4 Vozidlo 4 – ACCIONA 100 % EcoPowered .....	49
3.2.5 Výpočet a srovnání vstupních hodnot .....	50
3.2.6 Srovnávací varianta A .....	52
3.2.7 Srovnávací varianta B.....	54
3.3 Zhodnocení výsledků.....	57
<b>Závěr</b> .....	<b>59</b>
<b>Použité informační zdroje</b> .....	<b>61</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>71</b>

## ÚVOD

Elektrický pohon je v současné době jedním z hlavních témat jako možný způsob zmírnění produkovaných emisí. Z historického pohledu je také starší než dnes nejběžnější typ pohonu ve formě spalovacích motorů. Samostatně ale i kombinovaně s dalšími palivy nabízí množství konfigurací a nastavení, které upřednostňují jeho hlavní výhody. Mezi ně je možné zařadit především nízké nebo nulové lokální znečištění, vysokou účinnost nebo schopnost zpětného získávání energie ve formě rekuperace, a tak snížení celkových energetických nároků na jízdu.

Po začátku 21.století tak byly tyto přednosti také jedním z důvodů pro stále častější volbu elektrického nebo hybridního konceptu jako pohonu pro vozy i v závodních kategoriích motorsportu. Vznikají tak nové technologie pohonu, které jsou ale často striktně omezeny pravidly samotné kategorie či podmíněny volbou standardizovaných dílů bez možnosti dalších úprav. V některých však volnost ve využití týmového vývoje nebo alespoň částečného zapojení poskytuje výrobcům možnost implementovat vlastní použité technologie a otestovat je v náročnějších než užitelsky běžně známých podmínkách. Zároveň však tento aspekt může ubírat na rovnocennosti podmínek soutěže díky finančním možnostem jednotlivých týmů.

V motorsportu se objevují také vozy nasazované do volných kategorií nebo jednotlivých závodních akcí. Zde se často utkávají s dalšími způsoby pohonu v čele se spalovacími motory. Je tak možné jejich přímé srovnání v množství aspektů.

Jednou z takto pravidlově volnějších je i kategorie T1. Ta je součástí závodu Rally Dakar, kde se jsou vozy prověřeny extrémními podmínkami v kombinaci s vysokou jízdou vzdáleností. Nabízí tak možnost srovnání více koncepčních zpracování jednotlivých speciálů především ve vztahu k jejich energetickým schopnostem s hlavním zaměřením na porovnání s čistě elektrickým vozem.

# 1 ELEKTRICKÉ VOZIDLO

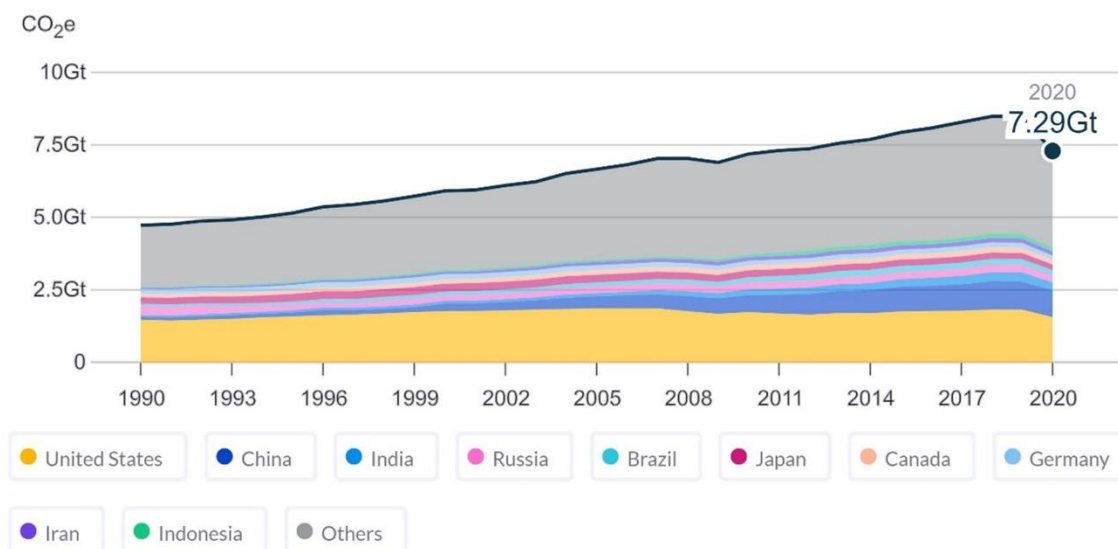
Základní popis vozidel poháněných elektřinou (dále jen ev) je možné interpretovat množstvím způsobů. Ve všech z nich se však vždy jedná o vozidlo, jehož pohon je zajištěn prací alespoň jednoho elektromotoru, jenž využívá elektrickou energii z baterie nebo jiného zdroje energie. Elektromotor může být v různých poměrech také kombinován s dalšími zdroji pohonu na kapalná nebo jiná pohonná média. Samotná baterie operuje s určitým výkonem a vlastní kapacitou dobíjenou za pomoci externího zdroje nebo procesy uvnitř vozu. [1]

Přechod od běžných spalovacích motorů k elektrickým koncepcím je jednou z mnoha možností ke snížení emisí skleníkových plynů. Již před 8 lety tvořila doprava téměř čtvrtinu celosvětových emisí CO<sub>2</sub> a v posledních letech má tento trend stále rostoucí tendenci. Ovlivněn byl tak téměř pouze koronavirovou pandemií, která mírnila množství využívané dopravy. I tak emise tvořené dopravou předčili sektor energetiky a dosáhly celkové hmotnosti přes 7,2 Gt. Otázkou tak zůstává, zda prosazování elektrické energie jako majoritního způsobu pohonu může v následujících letech zpomalit emisní růst nebo alespoň vyvážit náklady na její přenos a výrobu součástek pro její uchování a samotný pohon. [1] [2]

## Historical GHG emissions

CLIMATEWATCH

Data source: Climate Watch; Location: World; Sectors/Subsectors: Transportation; Gases: All GHG; Calculation: Total; Show data by Countries.

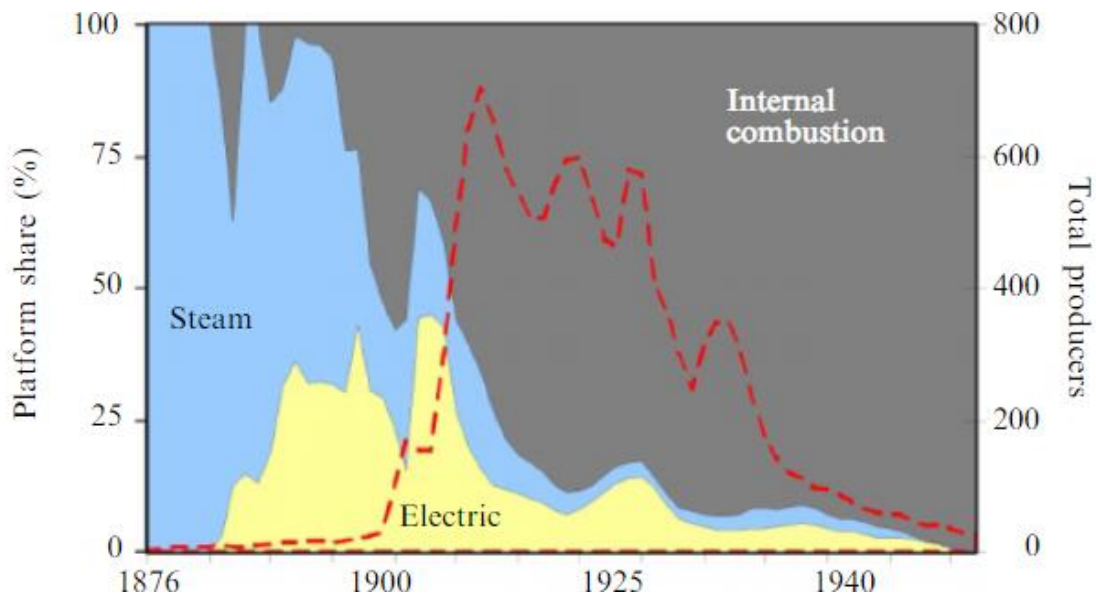


Obr. 1 Globální růst emisí skleníkových plynů v důsledku dopravy od roku 1990 [2]

### 1.1 HISTORIE A SOUČASNOST ELEKTRICKÝCH VOZIDEL

Procentuální rozdělení světové dopravy v předchozím století je téměř výhradně zastoupeno spalovacími motory ve všech jeho variantách. Až v posledním desetiletí se na trh dostávají ve větších počtech i modely s elektrickým pohonem. Jako přinejmenším nečekaný tak působí fakt, že samotná elektřina byla předmětem zkoumání jako forma pohonu více než 50 let před prvním vozidlem se spalovacím motorem. [3]

Samotnou historii elektromobilů tak lze ve zkratce rozdělit do tří historických období dle století.



Obr. 2 Graf procentuálního zastoupení výrobců automobilů vzhledem k typu a období [3]

### 1.1.1 19.STOLETÍ

Hlavním předpokladem ještě v 19. století byla doprava osob či nákladu za pomoci zvířat taženými povozy. Tento jev však narušily opětovné pokusy vynálezců experimentujících s prvními ev. Za jednoho z raných průkopníků je považován skotský vynálezce Robert Anderson. Ten představil svůj motorizovaný kočár již v roce 1832. Hlavním problémem tohoto modelu byla především baterie bez možnosti opětovného nabíjení, která se to objevila až na konci 50.let 19.století. Na Andersonovu myšlenku o pár let později navázal Robert Davidson s prototypem elektrické lokomotivy jménem Galvani. Ta umožnila jízdu na vzdálenost 2,5 km při rychlosti kolem 6,5 km.h<sup>-1</sup>. [4]



Obr. 3 Andersonův prototyp z roku 1832 [4]

Jako další milník z raného vývoje je možné zmínit patent elektromobilu z roku 1894, který adaptoval technologii dosavadních elektromobilů a člunů. S postupným zdokonalením baterií a konstrukce měl výkon  $2 \times 1,1$  kW a byl schopen dosáhnout rychlosti  $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  a dojezdu 40 km. Tyto přednosti zužitkoval vůz i při sérii závodů. Tam dokázal zvítězit na krátkých tratích i nad konkurenty se spalovacími motory. Pomocí dalších úprav pro použití v městském prostředí se z něj stal komerčně užívaný model Electrobat. Ten až do roku 1907 úspěšně konkuroval koňsky taženým taxi v New Yorku, Baltimoru nebo Bostonu. Za zmínku stojí propracovaná technologie vozu pro eliminaci doby dobíjení baterie, která by znamenala nižší časovou využitelnost a tím i zisk. Celý bateriový systém bylo proto možné v centrále podniku za pomoci jeřábu vyjmout, takže docházelo k prosté výměně použité baterie za plně nabitou během několika minut. [4]



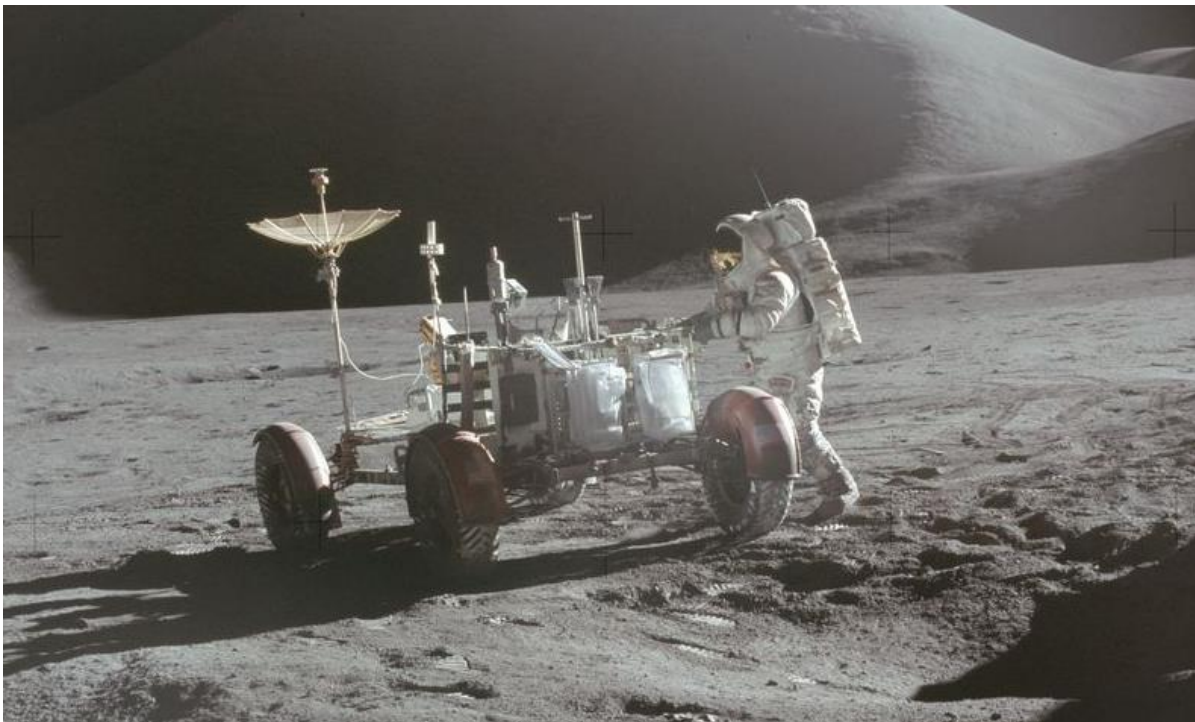
Obr. 4 Vozy Electrobat se zadním řízením [4]

### 1.1.2 20.STOLETÍ

Po přelomu století se v USA začínají projevovat výhody, které mohl elektromobil v tehdejší době nabídnout. Mezi patřil především tichý chod elektromotoru, produkce téměř nulového lokálního znečištění, jednoduché řízení či startování bez nutnosti použití kliky jako v případě spalovacích motorů. K těmto aspektům se postupně přidává i stále se zvyšující procento domácností disponujících elektrickým proudem. To vše zvedne jejich procentuální zastoupení ve společnosti kolem roku 1905 na téměř 40 %, což byl téměř dvojnásobek oproti spalovacím motorům a postupně upadající technologii páry. Stále se však jednalo o použití vozidel hlavně v městském prostředí. Pro delší jízdní vzdálenosti nebyl totiž tento druh pohonu především po stránce uchování energie stále ještě technologicky dostatečně uzpůsoben. [5] [6]

Další technický rozvoj byl v roce 1912 omezen díky produkčnímu vynálezu Američana Henryho Forda. Ten jako první začal s výrobou vozidel se spalovacími motory na zkonstruované montážní lince, čímž se již u svého prvního modelu s názvem „Model T“ dostal téměř na třetinu tehdejší ceny běžně dostupného elektromobilu. Modernizace silniční infrastruktury, stále nízký dosažitelný dojezd a příchod startéru jen přispěly k dalšímu propadu prodeji ev, které se v té době staly záležitostmi specifických odvětví nebo bohatších vrstev obyvatel. [5] [6]

S novými technologiemi ev tak přišli výrobci automobilů až po druhé světové válce. V Japonsku s nimi začala experimentovat značka Tama, která dodnes vyrábí i elektrické modely pod názvem Nissan. Ve Spojených státech zatím dostávaly ev prostor především jako dopravní prostředky pro sport. Ke zvýšení zájmu o tuto technologii vedl až vesmírný program NASA, který využil v roce 1971 elektricky poháněné lunární vozítko jako dopravní prostředek na měsíci. K tomu přispěly rostoucí ceny paliv společně s vlivem nově zaváděných emisních norem. Také nový technologický průlom v oblasti uchování energie ve formě lithium-iontových baterií v 80. letech znamenal pro ev možnost daleko většího dojezdu vzhledem k vysoké hustotě energie na jednotku hmotnosti. Li-Ion baterie je i dnes používána v různých upravených verzích jako hlavní pohonné médium elektrických zařízení. [6] [7]



Obr. 5 Elektrické lunární vozítko Lunar Rover na měsíci [4]

Výrobci automobilů se tak na počátku dalšího vývoje ev vydávali nejsnazší cestou a konstruovali prototypy na základech dosavadních modelů pouze s nutnými úpravami pro elektrický pohon. Příkladem jsou Ford Ranger EV, Honda EV Plus či TEVan od společnosti Chrysler, které dokázaly konkurovat benzínovým verzím především svým výkonem. Energetická kapacita baterie společně s její vysokou hmotností na článek ale neustále zabraňovala vyšším dojezdovým vzdálenostem než 130 km. Spolu s vlivem pořizovací ceny, která pro střední třídu byla pořád takřka nedosažitelná, tak mnoho návrhů zaniklo spíše ve fázi projektování nebo po výrobě prvních prototypových kusů. [8] [9]

Před začátkem nového století alespoň japonský průmysl představil první masově vyráběný vůz s kombinací dosavadních pohonů ve formě hybridního ev (zkráceně hev). Model Prius automobilky Toyota využíval nikl-metal hydridové články o celkové kapacitě 1,31 kWh. Výkon 43 kW od spalovacího motoru byl kombinován s elektrickým motorem o výkonu 30 kW. První generace tohoto vozu se však stala vysoce ztrátovou a sloužila tak spíše jako forma průzkumu trhu s novým typem pohonu v podmínkách běžného užívání pro následující hybridní nebo čistě elektrické varianty. [8] [9]



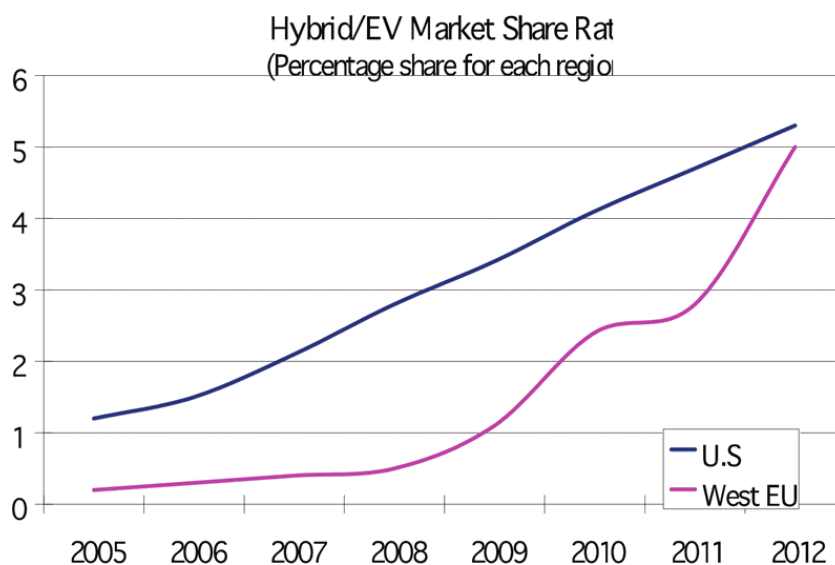


Obr. 6 Uspořádání pohonů v hybridním voze Toyota Prius [9]

### 1.1.3 21.STOLETÍ

Na počátku nového století vzniklo množství nových koncepcí uzpůsobených dosavadní technologií ev. Jejich hlavním producentem je dnes především společnost Tesla Motors, jejímž spoluzakladatelem je tvůrce jednoho z prvních sportovních ev s názvem TZero. Počáteční model Roadster vstoupil na trh již v roce 2008. Jako první sériově vyráběný vůz disponoval technologií lithium-iontových baterií a čistě elektrickým dojezdem přes 300 km. V dalších letech ho postupně následovaly Modely S, X, 3. Posledního zmíněného se zatím vyrobilo přes milion kusů, což je dosud nejvíce z hlediska všech ev. Nejnovější variantou je prozatím Model Y z roku 2020. [7] [8]

Mezi úspěšné modely ev nebo hev některých dalších světových výrobců je možné zmínit například Nissan LEAF, Chevy Volt, Honda Civic, Toyota Camry, Ford Escape, Hyundai Kona nebo Volkswagen ID.3. [7] [10]



Obr. 7 Procentuální podíl ev/hev na automobilovém trhu na začátku 21. století [10]

Velká část z těchto modelových verzí se tak již díky značně pokročilé technologii nemusela potýkat s množstvím předchozích nedostatků jako nízký výkon, rychlost či omezený dosah. Hlavním problémem se tak stala dostupnost dobíjecích míst a čas dobíjení. V USA proto do roku 2014 vzniklo více než 8 000 takových míst vybudovaných z větší části za podpory státu nebo samotných výrobců ev. Příkladem je síť Supercharger společnosti Tesla, která dnes čítá světově přes 50 000 nabíjecích míst. S jejím maximálním výkonem dobíjení 250 kW získá vůz znovu dojezd až 275 km za méně než 1 000 s. V České republice se těchto vysokorychlostních stanic k dnešnímu dni nachází zatím pouze 7. [8] [11]

Na světový trh se v roce 2021 dostaly také první technicky úspěšné pickup ev. Modely Rivian R1T, GM Hummer nebo Ford F-150 Lightning disponovaly všechny dojezdem přes hranici 450 km a zrychlením z 0 na 100 km.h<sup>-1</sup> kolem 3,5 s. [4]

Výrobci se tak v posledních deseti letech mohli začít více orientovat na tvorbu prototypů sportovních kategorií nebo naprosto odlišných koncepcí od sériově vyráběných vozů pro běžné spotřebitele. [4]

Mezi průlomové ev nebo hev modely z hlediska parametrů nebo dosažených rekordů posledních let lze tak zařadit:

- Lucid Air – překonávající jako první čistě ev hranici 800 km dojezdu. [12]
- Lotus Evija – nejlehčí sériově vyráběné hyperauto s hmotností pod 1700 kg a celkovým výkonem 1470 kW. [13]
- Rimac Nevera – nejrychlejší hev na světě s maximální rychlostí 412 km.h<sup>-1</sup>. [14]
- Aspark Owl – hev s nejvyšším zrychlením z 0 na 100 km.h<sup>-1</sup> za 1,69 s. [15]



Obr. 8 Model Lotus Evija [13]



## 1.2 TYPY ELEKTROMOBILŮ

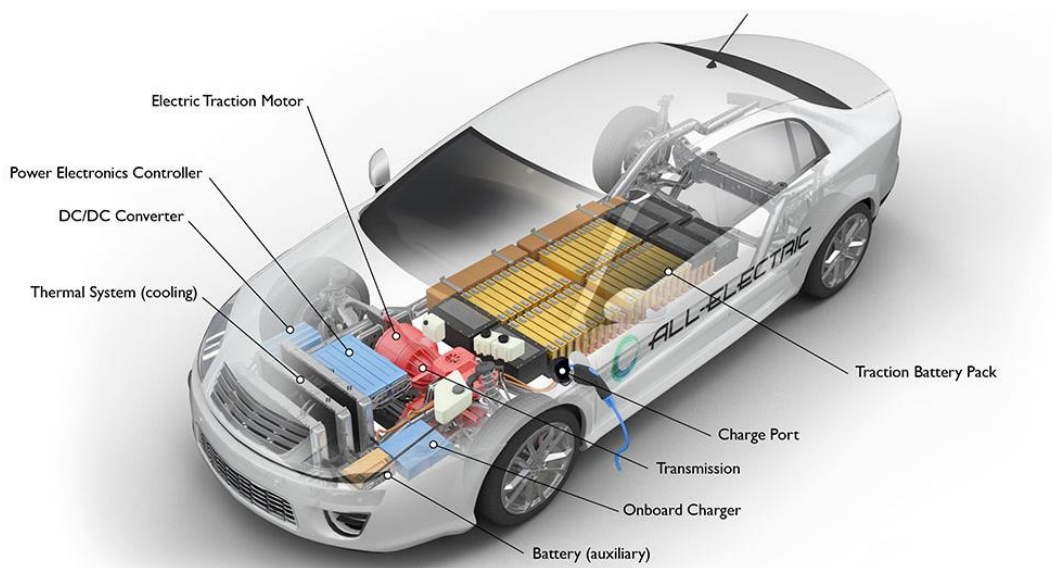
Energie pro pohon elektromobilu je zajištěna vždy minimálně jednou baterií, jenž zásobuje elektromotor pro pohon hnacího ústrojí. Funguje tak především jako způsob uchování této energie pro dlouhodobější využití, jehož délka je závislá na spotřebě vozu. Její dobíjení je pak možné jak z externího zdroje mimo vozidlo, tak díky dalším prostředkům uvnitř soustavy samotného vozu, a to i během jízdy. Baterie však není jedinou volbou, která se naskýtá pro pohon těchto typů vozidel. Pod označením elektrické se tak nacházejí i modely využívající různé kombinace spalovacích či jiných typů motorů s elektromotorem. [16] [17]

Právě pro dostatečné odlišení mnoha variant se elektromobily dělí na základní 4 typy. [17]

### 1.2.1 BATTERY ELECTRIC VEHICLES (BEVs)

BEV je typ elektromobilu poháněného pouze elektromotorem. energii pro pohyb získává s pomocí měniče, který se stará o přeměnu stejnosměrného elektrického proudu na střídavý ze sad baterií uložených přímo ve vozidle. Proto je kladen důraz na celkovou kapacitu těchto sad jako určujícího faktoru dojezdu a na výkon, jenž charakterizuje možnosti průchodu energie dodávané do motoru nebo při nabíjení. Závislost mezi kapacitou a celkovou hmotností vozidla ovlivněnou především zatížením samotných bateriových článků pak pro tyto typy znamená, že celkový dojezd často nedosahuje úrovně hybridních variant. Pro běžné typy BEVs se tak maximální dojezd pohybuje kolem hranice 200 km. U vyšších cenových kategorií je to pak až 500 km. [16] [17]

Hlavní výhody nachází především při použití v městských částech. Zde už méně zásadní omezený dojezd kompenzuje rychlým navýšením a dostatkem točivého momentu i při nižších rychlostech. Nevýhodným se tak stává hlavně z hlediska času nabití. Plné dobití všech bateriových sad z externího zdroje se dle konkrétních možností vozů a výkonů nabíjecích stanic pohybuje v řádech desítek minut až desítek hodin. To je stále mnohonásobně delší čas, než umožňují kombinované typy nebo vozy na čistě kapalné palivo. [16] [17]



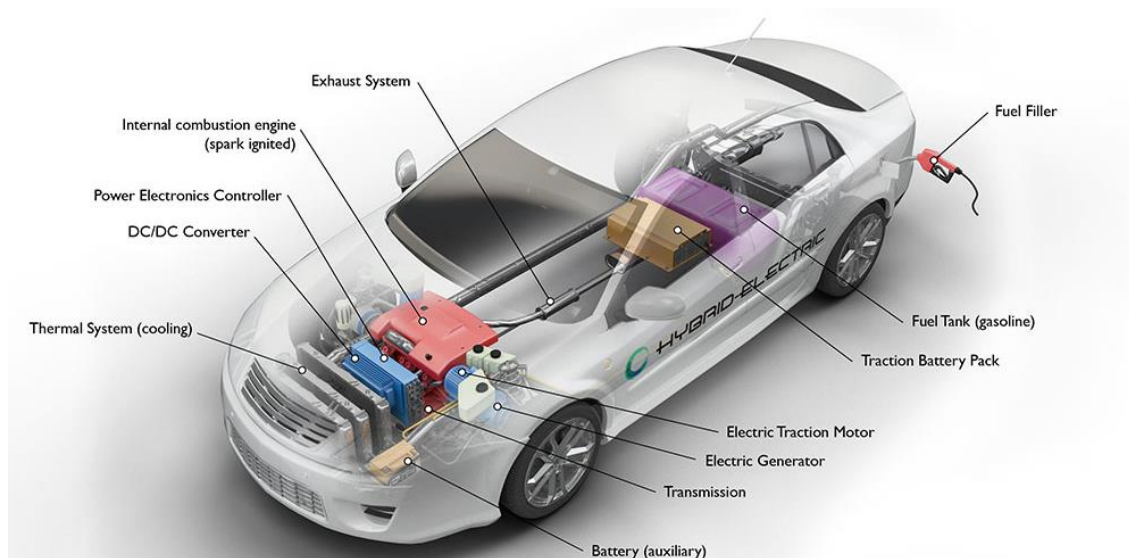
Obr. 9 Zobrazení vnitřních částí BEV [18]

### 1.2.2 HYBRID ELECTRIC VEHICLES (HEVs)

HEV je formou, která umožňuje kombinaci více způsobů pohonu vozidla. Existuje velké množství možných konfigurací vzhledem k dimenzování výkonů či prostorovým nebo hmotnostním omezením vozů. Například zmenšení spalovacího motoru může znamenat pokles jeho výkonnosti, ale zároveň navýšení prostoru pro elektromotor a baterie. To umožní vyšší čistě elektrický dojezd a redukci lokálně produkovaných emisí. Ve většině případů HEVs funguje se spalovacím motorem jako primární složkou pohonu. Pracovní doba elektromotoru jako sekundární složky je následně závislá na dobíjení a kapacitě baterie, která je na úkor primární pohonné kapaliny snížena. [16] [17]

Výhody toto spojení naskýtá především v možnostech fungování jednotlivých zdrojů pohonu, a to jak v sólovém režimu, tak souběžně. Elektromotor je výhodně využít krátkodobě při nižších rychlostech v městských částech a dlouhých dopravních zácpách. Spalovací motor se pak uplatní při vyšších dlouhodobých rychlostech. Spojení může představovat i kratší intervaly, kde elektromotor dokáže například efektivně vyplnit časový prostor mezi řazením vozu nebo přispět k navýšení zrychlení. Především u sportovních odvětví pak nachází využití z hlediska odstranění prodlev při aktivaci turbodmychadel. [16] [17]

HEV se zásadně odlišuje ve způsobu nabíjení baterie. Tu není možné u tohoto typu nabíjet z externího zdroje. Uloženou energii tak získává pouze přímo prací spalovacího motoru jako pohonu pro generátor nebo za pomoci tzv. rekuperačního brzdění. Tento typ nabíjení je realizován při zpomalování vozu, kterého je z části dosaženo přepnutím elektromotoru do režimu generátoru. Ten klade odpor při roztáčení kinetickou energií kol vozu, kterou následně převede do baterie jako energii elektrickou. [16] [19]



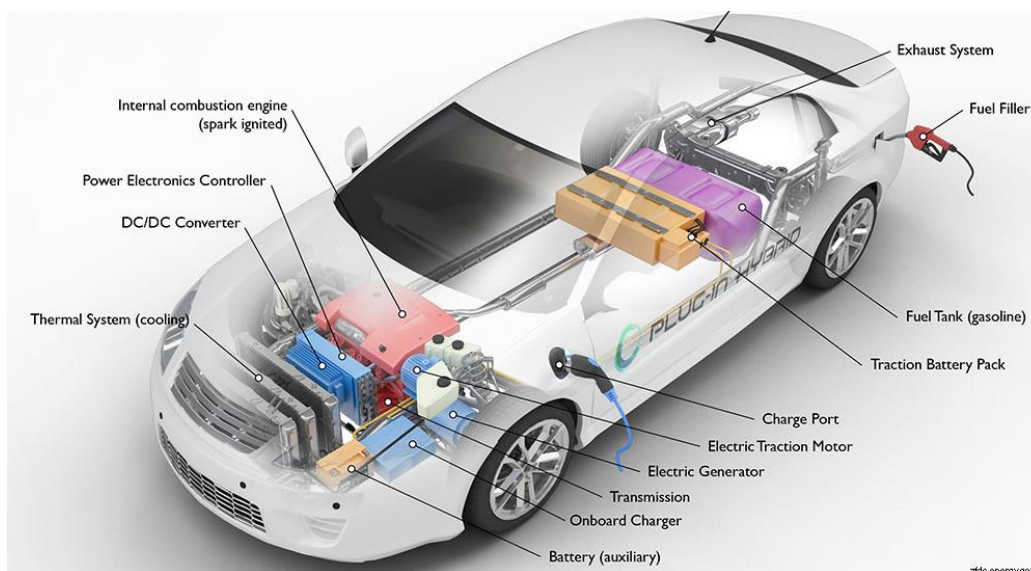
Obr. 10 Zobrazení vnitřních částí HEV [19]

### 1.2.3 PLUG-IN ELECTRIC VEHICLES (PHEVs)

Koncepce PHEVs je v mnoha aspektech podobná čistě hybridním verzím (HEVs). O pohon se také starají oba typy motorů (spalovací a elektrický), které mohou fungovat společně i samostatně. Umožňuje také dobíjení baterie za pomoci rekuperačního brzdění či práce spalovacího motoru. [16] [17]

Hlavním rozdílem je tedy procentuální poměr na pohonu vozidla a díky tomu také velikost některých komponentech vozu. Preferencí tohoto typu je co nejdelší možné využití emisně čistší formy na úkor spalování kapalných paliv. Elektromotor je tak spolu s baterií navržen pro co možná nejdelší samostatnou jízdu. Při ní mu v různých aspektech druhý způsob pohonu může výkonově sekundovat nebo úplně převzít pohonnou funkci. Funguje také jako jeden z možných způsobů dobíjení baterie i během jízdy. Druhý pak představuje běžné externí nabíjení z vlastní sítě nebo na některé z dobíjecích stanic. Primární mód vozidla tak vyžaduje větší prostor pro bateriové sady a elektromotor na úkor nádrže na kapalné palivo a spalovacího motoru. Další místo pak zabírá soustava pro externí nabíjení baterie. [16] [20]

Největší výhodou poskytuje tento typ větším počtem způsobů nabíjení, nižší ekologickou stopou a variabilitou více použitých pohonů. Nevýhodou přináší vyšší hmotnost z hlediska koncepce obou pohonů (především pak váha bateriových sad) a také čistě ekologický dojezd ve srovnání s možnostmi běžných vozů se spalovacím motorem. [16] [20]



Obr. 11 Zobrazení vnitřních částí PHEV [20]

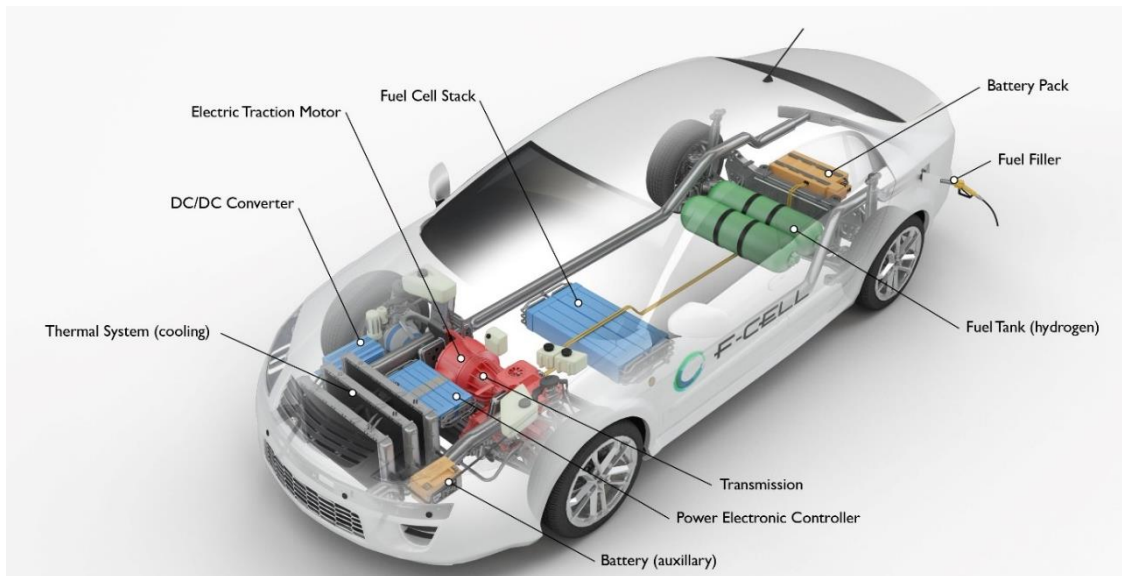
#### 1.2.4 FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES (FCEVs)

Poslední typ elektromobilu je od hybridních i čistě elektrických značně odlišný. Zásadní změnou v konceptu vozu je zdroj elektrické energie pro elektromotor. Předchozí typy se soustředily především na její kapacitně dostatečně velké uchování pro možnost co nejdelšího využití. To bylo následně nutné doplnit vnitřními procesy nebo externě pomocí nabíječky. FCEV naproti tomu využívá palivových článků, které jsou poháněny vodíkem. Ten v kombinaci s kyslíkem získávaným z okolního vzduchu chemickou reakcí vyrábí elektrickou energii, kterou je elektromotor přes měnič okamžitě poháněn. Energie tak nemusí být náročně skladována, ale je vyráběna přímo. Rozhodujícím je především objem vysokotlakých nádrží na vodík jako palivo. Ve vozidle se ale stále nachází menší počet bateriových sad. Jejich hlavním úkolem je znovuzískávání energie z rekuperačního brzdění nebo uchování přebytků energie vzniklé reakcí v palivových člancích. [16] [21]

Přínosem této technologie je především nulová lokální emisní stopa. Vodík společně s kyslíkem se totiž při reakci přemění na vodu, takže provozem nevzniká žádný uhlík.

Energie z baterie může taktéž pozitivně ovlivnit zrychlení nebo pracovat v situacích vyžadujících velmi nízkou spotřebu. Vodík se také doplňuje podobně rychle jako palivo do běžných konvenčních vozů což minimalizuje neproduktivní časová období při provozu. [16] [21]

Negativně tak zatím působí tento typ především z hlediska cenové náročnosti pro pořízení palivových článků a dostatečné bezpečnosti s ohledem na skladování vodíku v pohybujícím se voze. Další negativa souvisejí s menším počtem stanic pro doplnění konkrétní pohonné hmoty či správnou konfigurací velikosti palivových článků s ohledem na použití. [16] [21]



Obr. 12 Zobrazení vnitřních částí FCEV [21]



## 2 KATEGORIE ELEKTRICKÉHO MOTORSPORTU

Motorsport nabízí velké množství různých kategorií. Ty mohou být děleny v závislosti na světovém postavení šampionátu, formátech soutěžení a tratí či technických specifikacích zúčastněných vozů. V následující kapitole jsou tak zmíněny hlavní kategorie s čistě elektrickým pohonem a také vozy z otevřených kategorií elektrického motorsportu.

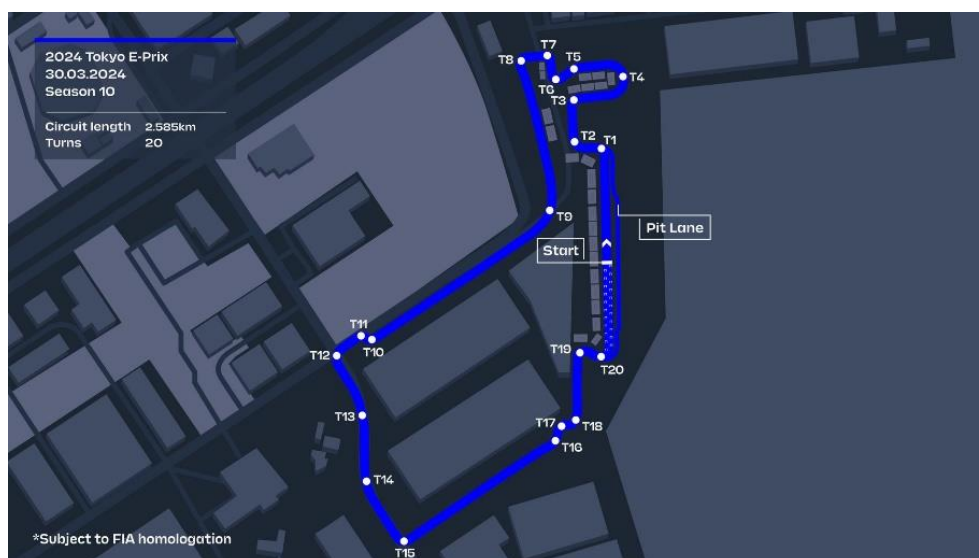
### 2.1 FORMULE E

#### 2.1.1 POPIS A VÝVOJ FORMULE E

Sportovní kategorii pod označení Formule E je možné charakterizovat jako první plně elektrickou sérii závodních vozů po vzoru Formule 1, která je jedním z nejslavnějších světových šampionátů vůbec. Konkrétně se jedná o městský motoristický šampionát jednosedadlových elektromobilů, ale oficiálně nese název mistrovství světa ABB FIA Formule E. První zmínky o tomto konceptu se datují do roku 2011. Hlavními cíli pro vznik byly především podpora udržitelné mobility společně se zvýšením zájmu o ekologicky čistý motorsport a vývoj technologií elektrických pohonů využitelných i v běžném silničním provozu. [22] [23]

Hlavní krok pro úspěšný start série byl podmíněn výběrem soutěžních okruhů splňujících množství náročných parametrů souvisejících s aplikací nově vyvíjené technologie. Následovaly prvotní testovací jízdy a nákup společných 42 monopostů pro všechny přihlášené týmy. S nimi byly poté rok před oficiálním startem provedeny předváděcí akce a další série testů pro ověření formátu a technických specifikací soutěže. [23]

Během uplynulých 10 sezón se v závodě prezentoval velký počet světových automobilových výrobců jako Audi, Andretti, Renault, Nissan, BMW nebo Jaguar. Ti závodili v množství světových metropolí, mezi něž se řadí například Tokio, Peking, Londýn, Miami, Moskva nebo Berlín. Zvýšený zájem o emisně čistý závodní sérii znamenal v roce 2019 (od druhé sezóny) povýšení seriálu na titul mistrovství světa. [22] [24]



Obr. 13 Podoba a informace o aktuálním závodním okruhu v Tokiu [25]

### 2.1.2 TECHNICKÉ SPECIFIKACE ZÁVODNÍHO VOZU

Závodní monopost prošel za uplynulých 9 soutěžních sezón značnou inovací všech použitých technologií. Tomu bylo nutné přizpůsobit celkový pohled jak z hlediska vizuální stránky vozu, tak množství komponent za ní. V základu je jejich množství například oproti konkurenční Formuli 1 mnohem nižší. Průchod energie začíná v člancích baterie a pokračuje přes měnič, kde dojde k přeměně stejnosměrného proudu na třífázový střídavý. Ten následně putuje do elektromotoru, který vyvine točivý moment procházející přes převodovku na jednotlivé nápravy. Vcelku působí tento koncept velice jednoduše, ale z hlediska technických specifikací je náročné dosáhnout optimálních hodnot účinností ve vztahu k materiálu rotoru a jeho otáčkám, které mají přímou závislost na dosaženém točivém momentu. [26]

Další podkapitoly se zaměřují na rozbor důležitých součástí vozu dle dostupných informací rozdělených na celkem 4 generační stádia.

#### GEN1

Již v úvodním představení celé kategorie Formule E v roce 2013, byl zmíněn počáteční záměr startu s vozy na stejném základu. Konkrétně se jednalo o vůz Spark – Renault SRT\_01E později charakterizovaný jako vůz generace 1 (GEN1). Na vývoji se podílelo hned několik světových automobilových producentů v čele s McLarenem, Dallarou a Williamsem. Hlavním cílem tohoto kroku bylo přesunout souboje o prvenství na tratě, a ne pouze do vývoje v závislosti na finančních prostředcích jednotlivých týmů. Naposledy byl využíván tento model ve čtvrté sezóně tedy v letech 2017/2018. [27]

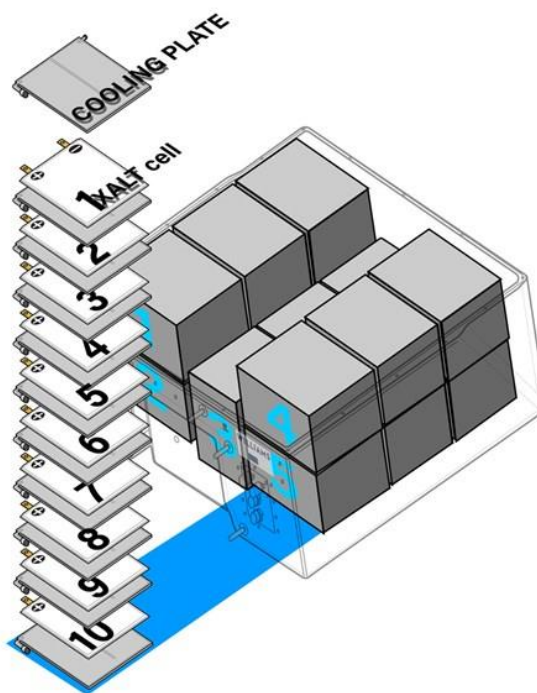
Po vzoru konstrukce vozů ze závodních seriálů Le Mans nebo Formule 2 a 3 byla vytvořena základní koncepce tvaru a materiálového složení karoserie a rámu GEN1. V případě ochranného prostoru kolem řidiče byla kombinována uhlíková vlákna, kevlar nebo hliník. Přední část vozu poskytovala především ochranu pro jezdce na úkor aerodynamického efektu. Křídla na obou koncích vozu poté získávala další nutný přítlak. Zavěšení a brzdový systém byly jedním z volných parametrů pro vývoj jednotlivými týmy. [28]



Obr. 14 Přední pohled na vůz GEN1 [29]

Z hlediska efektivního ukládání a využití energie byl pro vůz vybrán systém RESS. Ten umožňuje vícenásobné cykly vybití a nabití s možností zpětného ukládání energie i při samotné jízdě. Pro GEN1 byla použita jednotková bateriová sada od WAE jejíž kapacita dosahovala hodnoty 28 kWh s váhou kolem 250 kg. Tu doplňovala schopnost získat zpět do baterie až 15% využití jízdni energie ve formě rekuperačního brzdění. [28] [30]

Horní hranicí výstupního výkonu RESS byla stanovena hodnota 200 kW pro kvalifikaci a 180 kW pro hlavní závod. Samotné lithium-iontové články v podobě 400 plochých buněk byly naskládány v pěti samostatných modulech. Jejich základní stavba byla složena z kombinace vrstev článků a chladících plátů. To umožňovalo pasivní chlazení jak samotných článků, tak tepla z kontaktů, které byly taktéž významně zahřívány. Celé moduly byly navíc chlazeny dielektrickou kapalinou proudící přímo mezi nimi. Sada byla také opatřena bezpečností pojistkou, která měla za cíl udržet kapalinu uvnitř i při proražení. Nízké množství využitelné energie však znamenalo v prvních ročnících nutnost využití dvou vozů pro možné absolvování celé délky závodu. Závod se tak v polovině stal často velmi chaotickým, protože jezdci museli před výměnou takřka doběhnout od odstaveného vozu do stájových boxů pro nový vůz a ztratit minimum času, který by museli dohánět na trati. [28] [31]

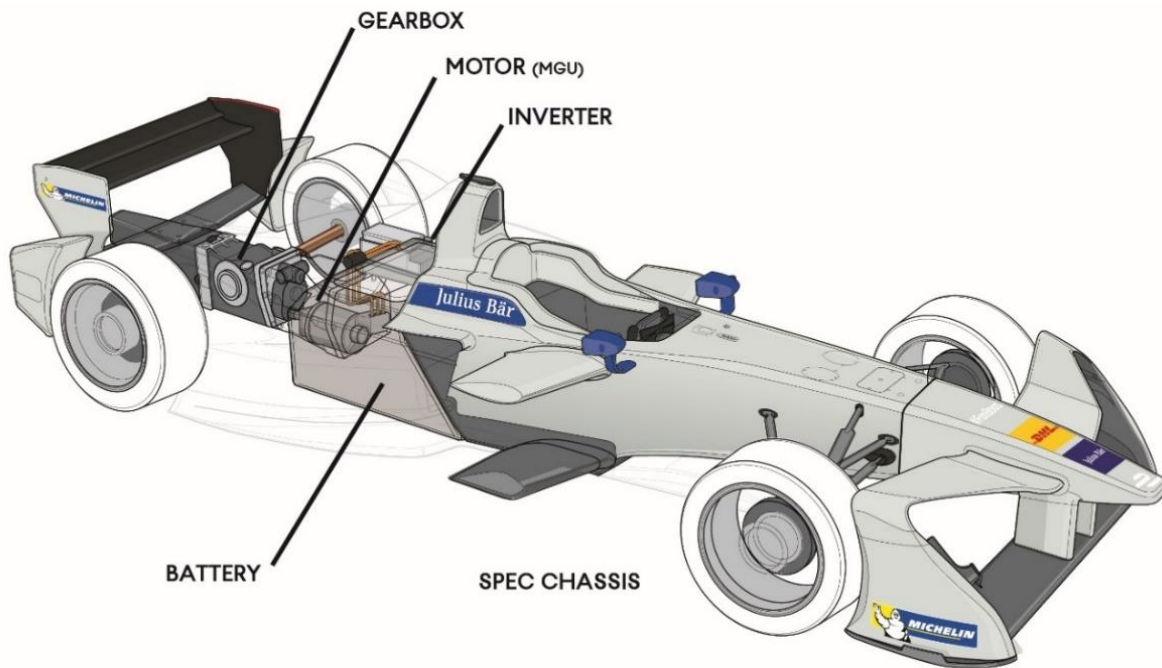


Obr. 15 Uspořádání plochých buněk baterie s pasivním chlazením [31]

Motorová generátorová jednotka, zkráceně MGU dokáže fungovat jako pohon i zpětný generátor energie. V první generaci byla zvolena jednotka McLaren s permanentními magnety v rotorech a statorovou cívkou s měděným vedením. Ta byla převzata z hybridního vozu McLaren P1. Její stavba tak byla uzpůsobena jako ve voze spíše kombinovanému použití s primárním spalovacím motorem, a tak nedosahovala potřebných výkonových a energetických specifikací pro čistě elektrický provoz. [28] [32]

MGU společně s převodovkou, měničem a chlazením vytvářejí klíčové parametry pro celkové vlastnosti vozu. Prvotní návrh počítal s využitím pětistupňové převodovky od HE

s řadícími pádly na obou stranách volantu. Chlazení bylo dělené jednotlivě po stranách vozu pro elektromotor s měničem a baterii. Od druhé sezóny však došlo k přesunu MGU do kategorie volných aspektů závislých na vlastním vývoji samotných stájí. Převodové ústrojí také prošlo změnou v poslední sezóně s GEN1 na jednodušší jednostupňovou variantu pro snížení ztrátovosti na jednotlivých převodech. Zásadní funkcí měniče pak byla přeměna stejnosměrného proudu na střídavý s vysokými nároky na dodržení frekvence pro třífázový elektromotor. Vůz tak dokázal vyvinout maximální rychlost  $225 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  se zrychlením z 0 na  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  kolem 3 s. [28] [30]



Obr. 16 Bližší poziční uspořádání součástí a pohonné jednotky GEN1 [33]

## GEN2

Po čtyřech úspěšných letech se v sezóně 2018/2019 objevily na startu nové verze s označením Spark SRT05e. Kompletní změnou prošla především vnější podoba vozu. Přední přítláčné křídlo po vzoru vozů kategorie F1 vystřídala daleko robustnější konstrukce. Ta přecházela i přes přední pneumatiky a dále podél boků vozu. Umožňovala lepší proudění vzduchu, vyšší přítlak a použití odnímatelných trubic. Ty se mohly nacházet po vnitřních stranách a fungovaly v teplotně náročnějších podmínkách jako přímé chlazení brzdového systému. Aerodynamický tvar pokračoval i v koncových částech rozevřením předchozího vodorovného křídla souvisle s celou zadní nápravou. Volitelná zadní skříň k uchycení odpružení byla tvořena z uhlíkových vláken. Pro vyšší ochranu řidiče pak vůz získal odolný titanový oblouk. V závislosti na dispozicích řidiče vážil celý komplet téměř 900 kg. [28] [34]

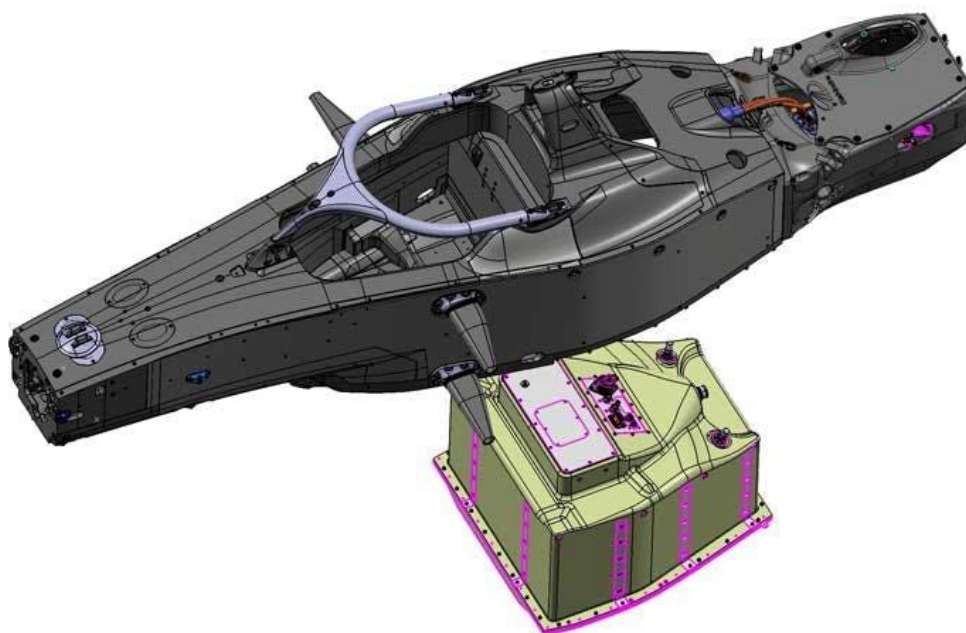
Zásadní změnu dostal systém RESS. Vyráběný nově od společnosti MAT vážil bezmála 385 kg a byl najednou schopný pojmout až 54 kWh energie. Po odečtení nákladů před a po samotném závodě byla však jeho kapacita snížena o téměř 20 %. To však stále stačilo na kompletní projetí stanovené doby závodu. [28] [33]





Obr. 17 Přední pohled na model GEN2 [29]

Celý bateriový systém byl složen z pěti hlavních modulů, ve kterých se nacházelo přes 5000 Li-Ion článků s celkovým napětím 880 V. Hlavním rozdílem od GEN1 tak byl úspěšný pokrok v technologii cylindrických článků a využití vyššího maximálního napětí. Zvýšila se i procentuální návratnost formou rekuperace, a to až na 30 % z celkové využití energie během závodu. Chladicí systém řízený za pomoci BMS ochlazoval v závislosti na aktuálních teplotách články průchodem dielektrické kapaliny přímo kolem nich. O plynulý průtok se staralo elektrické čerpadlo. Další extrémně zahřívány byly i kontakty baterie, jejichž chlazení probíhalo pasivně. Pro dosažení nejvyšší účinnosti bylo potřeba držet teplotu v blízkosti hladiny 30°C. Příliš vysoká nebo kritická teplota by vyústila ve snížení výkonu až nucené vypnutí vozu. [28] [33]



Obr. 18 Porovnání velikostí bateriového systému vzhledem ke zbytku modelu GEN2 [28]

Pro konverzi dvoufázového stejnosměrného proudu z baterie na třífázový vysokofrekvenční střídavý proud při vysokých hodnotách napětí bylo nutné vytvořit měnič se speciální polovodičovou technologií. Dvoufázový proud z baterie se v něm dostává do první části, kde prochází přes sběrnice na přepínače, které jsou logickou deskou řízeny z hlediska převádění proudu. Samotný výkon a účinnost měniče je tak charakterizována rychlostí se kterou jsou tyto přepínače schopny proud přepínat a jakou hodnotu proudu a napětí přitom ztratí. Pro měnič tak byly vybrány přepínače MOSFET z karbidu křemíku, které odolají vysokým hodnotám napětí a proudu z baterie a jsou odolné i z hlediska tepelné zátěže. [31] [33]

Hlavní pohonná část byla tvořena třífázovým rekuperačním MGU o výkonu maximálně 250 kW. Konkrétně se jednalo o synchronní bezkartáčový motor s permanentními magnety. Vinutí se tak netvořilo kolem rotoru, ale bylo součástí nepohyblivého statoru. Výhodou byla tvorba až dvojnásobku točivého momentu z každého pólu či jednodušší možnost chlazení. Vinutí cívek bylo statické a nacházelo se na vnitřní straně obalu elektromotoru. Z vnější části tak bylo ochlazováno okruhem proudící dielektrické kapaliny poháněné elektrickým čerpadlem. Celý válcový komplet s průměrem 30 cm dosahoval délky až 40 cm a maximální hmotnosti 20 kg. [31]

Z hlediska fungování tohoto motoru bylo nutné stanovit ideální rozsah otáček. Vyšší hodnoty přinášely lepší účinnost, ale nižší dodávaný točivý moment a jejich omezení bylo dáno také použitým materiálem rotujících částí. U nižších otáček byl tento moment vyšší, ale motor dosahoval horších účinností, a tak i vyšší spotřeby, což byl vzhledem k omezené kapacitě baterie hlavní negativní faktor. Vůz tak dokázal pracovat s točivým momentem až 200 Nm a v rozsahu do maximálně 20 000 ot.min<sup>-1</sup>. [31] [33]

Vysoké hodnoty výkonnostních parametrů umožnily vozidlu pracovat v širokém rozmezí rychlostí bez potřeby řazení rychlostních stupňů a spojky. Pro sladění rychlosti kol a motoru bylo ale nutné v takto vysokém rozpětí otáček využít redukční převody. V závislosti na volbě týmů byl použit většinou jeden redukční převod s velkým věncem kolem diferenciálu nebo dvojice převodů s menším věncem. [31] [33]

Počet elektromotorů byl v první sezóně s vozem GEN 2 stále ještě libovolný což však neplatilo o maximálním průchodu energie do motoru a schopnosti její zpětné rekuperace. Téměř všechny týmy tak volily uspořádání s jediným elektromotorem, který dosahoval maximálních hodnot, a přitom vůz hmotnostně více nezatěžoval. Naopak tým Nissan se pokusil o koncepci dvou velikostně různých elektromotorů. Větší z nich byl hlavní pohonnou jednotkou a posílal také energii zpět do baterie při rekuperačním brzděním. Menší naopak fungoval jako skladovací prostředek na podobném principu jako setrvačnick a ukládal vytvořenou kinetickou energii. Před zatáčkou tak pracovaly oba motory současně díky propojení přes planetovou převodovku a přenášely energii na diferenciál. Po započetí brzděné fáze začal větší motor posílat rekuperovanou energii zpět do baterie, zatímco menší se mohl stále volně otáček vlivem setrvačnosti. Při zrychlení po průjezdu nejvyšším bodem zatáčky tak vůz získal dodatečnou energii uchovanou z předchozího úseku a mohl vyvinout vyšší zrychlení. Pravidla další sezóny však neumožnila tuto technologii dále využívat. [31] [33]

### GEN3

Po vzoru předchozí výměny generací vozů se do šampionátu v 9 sezóně dostala v pořadí třetí s názvem Spark Gen 3. Tvar aktuálně používané generace se výrazně odchyloval od té předchozí

a vůz se tak podobá v mnohém nynějším monopostům F1. Hlavními změnami je šípovitý tvar bez překrytí kol v přední i zadní části, dvojité přední přitlačné křídlo nebo citelně mohutnější přívodní otvor vzduchu za řidičem. Rozvor, šířka, výška, a dokonce i celková délka vozu je však snížena. Plná hmotnost tak po všech úpravách klesla až o 60 kg. [35]



Obr. 19 Aktuální modelová podoba vozu GEN3 [36]

Třetí modelová generace nabízí z hlediska uchování energie nižší kapacitu než předcházející s maximální hodnotou jen téměř 40 kWh. Snížená kapacita má ale z technického hlediska opodstatnění díky využití technologií ukládání energie s vyšší energetickou hustotou a výkonem než u předcházejícího modelu. Menší počet bateriových článků v tomto případě znamená také úbytek váhy kolem 100 kg. Zároveň je vozidlo nově opatřeno rekuperací energie z přední i zadní nápravy. To ve výsledku umožňuje návratnost až 40% spotřebované energie zpět do článků a další pokles váhy odstraněním přebytečných zadních hydraulických brzd. Externí nabíjecí rychlost je také zvýšena na 800 kW. [28] [30]



Obr. 20 Zobrazení předního a zadního MGU společně se systémem RESS vozu GEN3 [36]

Poprvé od GEN 1 jsou na vůz nasazeny dvě MGU po jedné na každé nápravě. K pohonu vozu je ale stále využívána pouze zadní. Přední o výkonu až 250 kW se tak aktivuje pouze při

zpomalování jako další generátor rekuperované energie, která je vracena do bateriového systému. Tento krok tak umožnil získání mnohem většího množství energie a vzhledem k nízké hmotnosti elektromotoru také přispěl ke snížení celkové váhy, která by jinak musela být přidána další kapacitou baterie. Vůz tak disponuje společným výkonem pro rekuperaci se zadní nápravou až 600 kW. Pro obě MGU je nutný také vlastní měnič. S ohledem na rozdílnou rekuperační schopnost na každé nápravě a pohonu pouze na zadní je možné zvolit rozdílné měniče pro ušetření další hmotnosti. MGU i měniče jsou však chlazeny jednotlivě paralelními okruhy s dielektrickou kapalinou. Jako převodovka je stále využívána pouze jednostupňová s vlastním nastavitelným samosvorným diferenciálem. Závodní speciál dokáže díky všem těmto aspektům při závodě atakovat hranici až 320 km.h<sup>-1</sup>. [28] [35]

## GEN4

Po nedávném představení GEN3 se znovu rozjel 4letý cyklus vývoje nové generace. Ten by tak měl být představen v sezóně 2026/2027. Z hlediska některých parametrů tak jde stále jen o předem stanovené limity, protože první testování proběhne koncem tohoto roku. [37]

Konkrétní podoba vnějšího vzhledu není zatím přesně jasná. Cílem je především zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu. K tomu by měly přispět určité vyměnitelné části vozů neboli aero sady pro různé závodní podmínky. Kvůli změnám z hlediska MGU a baterie by se měly všechny rozměry až na celkovou délku zvýšit. Tomu nasvědčuje i celková hmotnost převyšující všechny předchozí generace s hodnotou kolem 930 kg. [37] [38]

Budoucí vývoj se má jistě dotknout i hlavního ukazatele dojezdu. Požadavky na celkovou kapacitu baterie narostly až o 15 kWh oproti GEN3. Schopnost rekuperace získané energie by měla díky rovnoměrnému dělení mezi přední a zadní nápravu stoupnout na výkon 700 kW. Do formátu by se měla také zařadit nová možnost ultra rychlého nabíjení v boxech v průběhu závodu. Celou tuto sadu bude zajišťovat společnost WAE. [37] [38]

Výkon MGU by měl být opět o něco vyšší především díky přidání aktivního pohonu druhé nápravy. Vůz tak získá až dvojnásobek výkonu předešlé verze, tedy kolem 600 kW. Možné je tak vzhledem k výkonnostnímu skoku zařazení nových sprintových závodů. Ve hře je také přidání posilovače řízení nebo jiného provedení dodávaných pneumatik. [37]

### 2.1.3 FORMÁT ZÁVODU A PRAVIDLA

Pro každou kategorii motorsportu je nutné co nejjednoznačnější znění pravidel týkajících se jak samotného formátu závodu, tak především technických aspektů vozidla.

Níže proto byl sepsán výběr nejdůležitějších aspektů šampionátu podle poslední verze sportovních [39], technických [40] pravidel FIA a oficiálních stránek Formule E [41].

## TÝMY A JEZDCI

Pro aktuální ročník bylo vypsáno celkem 12 účastnických míst. V současnosti je jich ale zaplněno pouze 11, kde za každý jednotlivý tým mohou v soutěži nastupovat 2 jezdci.

Základní startovné je stanoveno na 141 060 EUR (v přepočtu cca 3,6 mil. Kč) za každého přihlášeného jezdce.

### FORMÁT KATEGORIE

Jednotlivé závodní podniky během šampionátu mohou být jednodenní, kdy jsou provedeny jak tréninky, kvalifikace i hlavní závod nebo dvoudenní, kdy probíhají kvalifikace a 2 bodovaná kola závodu. Systém kvalifikace začíná skupinovou fází, do které jsou jezdci rozřazeni podle aktuální bodové pozice v šampionátu na dvě skupiny. Po 12minutovém časovém úseku s maximálním využitelným výkonem 300 kW postupují 4 jezdci z každé skupiny s nejrychlejším časem kola. Ti se poté utkají v duelech dvojic, kde se maximální využitelný výkon navýší na 350 kW. V závěru se proti sobě postaví nejrychlejší z obou skupin. Vítěz kvalifikace získá první pozici v hlavním závodě. Další pozice jsou určeny podle výsledků dosažených ve vyřazovací části a následně nejrychlejšího času kola. Počet kol je rozdílný dle jednotlivých soutěžních okruhů. Závod však nemůže trvat déle než 75 minut spolu s přidanými koly v důsledku případných přerušení.

### TECHNICKÁ PRAVIDLA PRO NEMODIFIKOVATELNÉ SOUČÁSTI VOZU

Mezi hlavní části vozu, které není možné samovolně vyvíjet a upravovat týmy v rámci pravidel se řadí: ochranná schránka řidiče, volant, systém řízení, přední MGU, karoserie, podvozek, tlumiče, pneumatiky a další.

Všechny rozměry karoserie nesmí přesáhnout stanovené limity (1707 × 1025 × 5020 mm). Je povoleno pouze nastavovat základní pevně upevněné aerodynamické prvky vozidla. Není možné přidat další zařízení pro ovládání proudění vzduchu.

Celková hmotnost vozu je zjišťována před každou kvalifikací a hlavním závodem. Se započítanou váhou jezdce nesmí být nižší než 854 kg. Hmotnost jezdce nesmí společně s ochrannou skořepinou a sedadlem podkročit hmotnost 80 kg. Přední část vozu musí být vždy zatížena minimálně 42% celkové váhy.

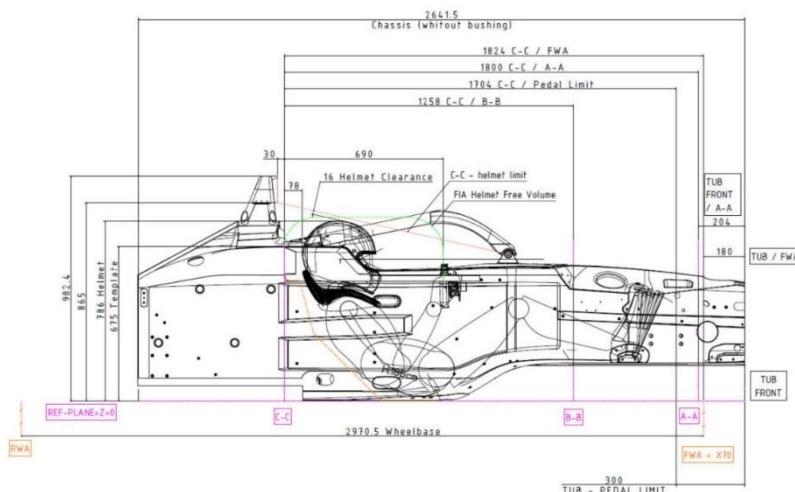
### TECHNICKÁ PRAVIDLA PRO MODIFIKOVATELNÉ SOUČÁSTI VOZU

Mezi hlavní části vozu, které je možné vyvíjet a upravovat týmy v rámci pravidel se řadí: zadní MGU, skříň převodovky, zadní hnací hřídel, konstrukce zadního krytu a převodovka s tím, že musí umožňovat i reverzní chod a být redukční z hlediska převodového poměru.

Během celé sezóny smí vůz využít pouze 1 RESS systém, 2 MGU, 2 převodovky, 2 měniče a 6 předních a zadních tlumičů. Je zakázáno použití systému redukující protáčení kol nebo kompenzaci nadměrného točivého momentu.

Během závodu je maximální výkon omezen na 300 kW. Po přejetí předem určeného místa na trati je pak možné využít výkon až 350 kW. Ve stanovených závodech je povinné po tomto zvýšení provést rychlé nabíjení v boxech.





Obr. 21 Rozměry ochranné schránky řidiče ve voze GEN3 [40]

## 2.2 EXTREME E

### 2.2.1 POPIS A VÝVOJ KATEGORIE EXTREME E

Off-roadová kategorie motorsportu schválená FIA, která byla založena v roce 2021. Prvotní plány a představení však probíhaly již na konci roku 2019 v Londýně. V základu je možné ji charakterizovat jako čistě elektrickou závodní sérii SUV vozů odehrávající se na předem vybraných netypických a ekologicky poškozených místech planety. Mezi ně se řadí například: Grónsko, Saudská Arábie, Chile, Senegal nebo Uruguay. Letošní sezóna bude finálovou pro celou tuto závodní sérii. Plánované je v roce 2025 nahrazení novým formátem Extreme H, tedy vozů na vodíkový pohon. [42] [43]

Mezi cíle, které si klade, řadí především vývoj nových technologií elektricky poháněných vozů k dosažení nižší produkce emisí. Šampionát tak cílí na přehlíženou část všech motoristických kategorií, kterou je logistika. Největší náklady představují přesuny na jednotlivé soutěžní seriály, jenž se konají po celém světě a jsou tak nejčastěji zajišťovány formou letecké dopravy. Závodní série Extreme E tak v tomto ohledu spoléhá na lodní dopravu, kdy je na jediné lodi situováno zázemí týmů, závodní speciály nebo mediální centrum. Toto forma tak snižuje ekologický dopad celé kategorie o více než 60 %. [42] [44]

### 2.2.2 TECHNICKÉ SPECIFIKACE ZÁVODNÍHO VOZU

Již od první sezóny sdílejí všechny týmy jediný typ SUV závodního speciálu pojmenovaný Odyssey 21. Jeho přestavení proběhlo již v polovině roku 2019. Následovala řada testů, kdy vůz úspěšně absolvoval i první rychlostní zkoušku v rámci Rally Dakar 2020. Převážná část vozidla se skládá ze standardizovaných dílů od seriálem vybraného výrobce, kterým byl zvolen Spark Racing Technology. V zahajovací sezóně týmy i přes počáteční oznámení o možném vývoji některých dílů sdílely kompletní technologii vyvinutou šampionátem. Tyto podmínky tak umožnily nejvyrovnanější způsob soutěže. Později byl ale vývoj některých dílů pouze pod pravidlovým omezením jednotlivých specifikací znovu umožněn. [42] [45]

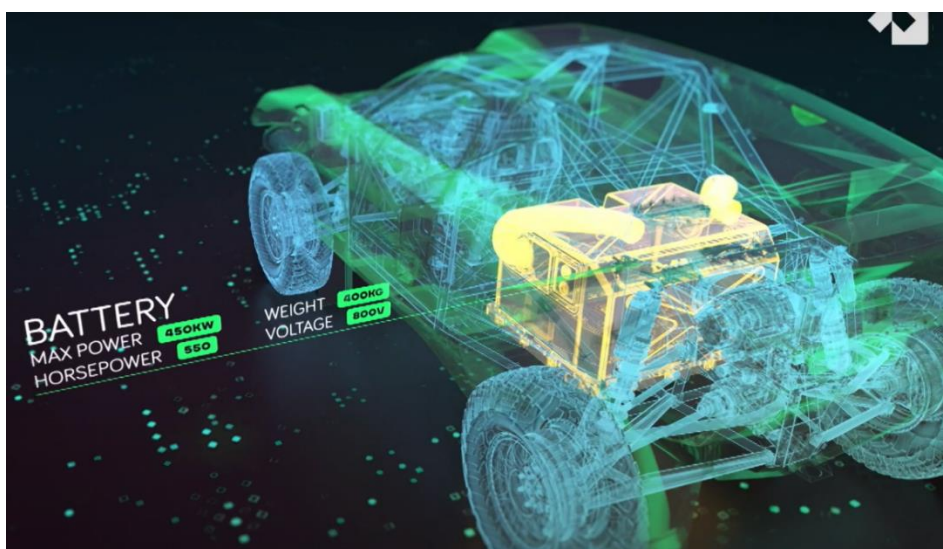
Základní trubkový ochranný rám a podvozek jsou tvořeny z vysokopevnostní oceli vyztužené niobem. To poskytuje mez pevnosti až 2000 MPa a snížení původního zatížení o 20 % na celkovou hmotnost 1900 kg. [45] [46]



Obr. 22 Vysokopevnostní rám vyztužený niobem [47]

Celá karoserie je vyrobena z přírodních lněných vláken. Jejich hlavní předností je vysoká tuhost v ohybu. V porovnání s běžně používanými uhlíkovými vlákny poskytuje stejnou hmotnost, ale lepší schopnosti z hlediska tlumení vibrací a hluku. Zvýšena je i bezpečnost v případě lomu materiálu, protože při něm nejsou tvořeny ostré hrany. [45] [48]

Bateriový systém byl vytvořen společností WAE. Bateriové sada skládající se z 3 600 lithium-iontových článků disponuje kapacitou až 54 kWh v níž je započítána i maximální dosažitelná schopnost rekuperace. Samotná kapacita je tak pouze 40 kWh. Její konstrukce je vyvinuta pro fungování ve velkém teplotním rozpětí z důvodu jednotlivých etapových míst. Pro pohon elektromotorů dokáže vyprodukovat výkon přes 450 kW a disponuje napětím 800 V. Z hlediska životnosti se počítá s jejím užíváním vždy na minimálně 2 celé sezóny. Hmotnost celého systému přes 400 kg představuje až 25 % kompletní váhy vozu. O nabíjení se starají přepravitelné vodíkové nabíjecí stanice. [47] [49]



Obr. 23 Pozice a velikost bateriového systému [50]

Pohon zajišťují celkem 2 MGU umístěné po jedné v přední a zadní části. Každá z nich produkuje až 250 kW výkonu. Vozy s nimi dosahují maximální rychlosti až 200 km.h<sup>-1</sup> se zrychlením z 0 na 100 km.h<sup>-1</sup> za 4,5 s a točivým momentem přes 920 Nm. Díky takto vysokému výkonu dokáže vozidlo zdolávat v závislosti na terénu stoupání se sklonem až 53 °. Taktickou možností jednotlivých vozů je volba vyvážení točivého momentu na jednotlivých nápravách, kterou může jezdec volně upravovat a tím získat vyšší energetickou účinnost. Systém umožňuje také krátkodobé zvýšení výkonu funkcí Hyperdrive jednou za etapu. MGU a měnič jsou jedněmi z možných vývojových produktů týmů, takže jejich bližší specifikace jsou vzhledem k vlastním aplikovaným technologiím utajovány. [45] [49]



Obr. 24 Umístění předního MGU [50]

Jako brzdící komponenty jsou použity šestipístkové radiální brzdové třmeny Alcon s 355 mm ventilovanými brzdovými kotouči pro lepší odvod tepla. Pro dostatečné odpružení je zvoleno dvouprvkové zavěšení s třícetně nastavitelným tlumičem umožňující zdvih až 385 mm a pohlcení hydraulických rázů a odskoků. [47] [49]

### 2.2.3 FORMÁT ZÁVODU A PRAVIDLA

Během všech sezón došlo k proměnlivému zastoupení v počtu týmů. Tomu byly přizpůsobeny sportovní pravidla a celkový formát kategorie. Níže jsou proto vybrány hlavní aspekty z hlediska týmů, jezdců, sportovních pravidel [51] [52] a technických omezení, které se týkají určitých technických parametrů vozu [53].

#### TÝMY A JEZDCI

V aktuálním ročníku soutěží 8 týmů z 12 možných míst. Každý z nich závodí s jedním vozem a dvoučlennou posádkou. Ta musí být ve složení muž a žena, kde se oba podílejí ve stejné délce na řízení vozu. Jednu ze strategií tak tvoří volba jezdce na startu, která však musí být během sezóny také z hlediska zastoupení rovnoměrná.



## FORMÁT KATEGORIE

Série během roku probíhá na 5 světových místech. Program dvoudenního závodu začíná tréninkovými jízdami a celkově nabízí 12 měřených závodních jízd. Jednotlivé závodní okruhy obsahují 2 nebo 4 kola v závislosti na dané lokaci v celkové délce průměrně 14 km (minimálně 3 km a maximálně 20 km). Sudý počet je nutný k pro dodržení formátu 2 jezdců. Na každé trati se tak vyskytuje místo pro výměnu, kde si posádka prohodí svá místa. Základní uspořádání série se skládá z dvoukolové kvalifikace. Body z nich poté rozřadí týmy do dvou finálových jízd (malé a velké finále).

## TECHNICKÁ PRAVIDLA PRO NEMODIFIKOVATELNÉ SOUČÁSTI VOZU

Všechny rozměry karoserie nesmí překročit stanovené limity (2300 × 1870 × 4410 mm). Minimální hmotnost vozu nesmí klesnout po celou dobu pod 1785 kg.

Řídící jednotka VCU, senzory a software VCU, systém RESS, chladicí systém, převodovka, hnací hřídel, diferenciál, zavěšení, pružiny a tlumiče nejsou týmům umožněny modifikovat.

Každý z jezdců má možnost dvakrát za své kolo kvalifikace a jednou během finále využít funkci Hyperdrive, která umožní několikasekundové zvýšení výkonu vozu.

Jediným zařízením uchovávajícím energii pro pohon vozu je systém RESS, jehož je trakční baterie součástí. Mimo něj může být energie uchována pouze v kondenzátorech měniče a pomocné baterii. Schválení systému RESS je platné vždy na dobu 4 let.

Převodovky se řadí mezi díly ze společné sady pro všechny týmy. Vůz disponuje celkově dvěma. Jednou převodovkou pro každé MGU. Obě musí být identické a mít pouze jeden pevný redukční poměr. Týmy mohou volit v rozmezí 10,687 až 17,099. Takto konstruované převodovky musí umožnit i reverzní chod. Ke každé MGU pak náleží také jeden diferenciál a hnací hřídel.

Kompletní systém zavěšení se jako společný díl může upravovat pouze z hlediska tuhosti pružin na přední a zadní nápravě. Existují 3 možné konfigurace viz Tab. 1.

Tab. 1 Přehled možných konfigurací tuhostí pružin jednotlivých náprav [53]

Konfigurace	Tuhost vpředu	Tuhost vzadu
	$k_p$ [N·mm <sup>-1</sup> ]	$k_z$ [N·mm <sup>-1</sup> ]
Základní	60	80
Měkká	50	75
Tvrdá	70	95

## TECHNICKÁ PRAVIDLA PRO MODIFIKOVATELNÉ SOUČÁSTI VOZU

Pro součásti vozu není možné použití kovového materiálu s vyšším modulem pružnosti než 40 GPa a jakéhokoliv plechových dílů z hořčíku. Je možná dodatečná úprava dílů karoserie

kromě základní ochranné kabiny převrtáním, oříznutím v maximální 50 mm od náběžných hran konkrétního dílu.

Není dovoleno použití pohyblivých aerodynamických prvků nebo prvků jinak ovlivňujících proudění vzduchu. Přítláčné komponenty vozu musí být pevně spojeny s podvozkem.

Motorovou generátorovou jednotku MGU je možné vytvořit na základě vlastního vývoje nebo od výrobce, který může takto specifikovaný model uvolnit maximálně pro dva týmy. Vůz obsahuje vždy celkem 2 MGU po jedné na každé nápravě, které musí být shodné a spojené s podvozkem. Musí poskytovat maximálně 20 000 ot.min<sup>-1</sup> a na každé nápravě má svůj vlastní měnič s omezením maximálního výkonu 200 kW.

## **2.3 FIA WORLD RALLYCROSS CHAMPIONSHIP**

### **2.3.1 POPIS A VÝVOJ KATEGORIE WRX**

Kategorie se zkráceným označením WRX nebo World RX schválená FIA v roce 2014, kdy od počátku fungovala pouze pro vozy se spalovacími motory. Posun technologií elektrického pohonu však umožnil v roce 2022 přechod k čistě elektrickým soutěžním vozům. Základní charakteristikou této kategorie je spojení závodních formátů off-roadového motorsportu a závodění na kratších upravených okruzích v tzv. rallycross. Kombinuje netradičně více možných jízdních povrchů jako písek, šotolinu nebo asfalt na krátkých několikakilometrových tratích s množstvím jízdních překážek. Hlavním rozdílem je také způsob závodění, kdy ve startovním roštu vyráží několik jezdců ve stejný okamžik a ti tak nemají k dispozici celou šířku trati, která je v některých místech navíc ohraničena. Výkonově nejvýše postavené vozy této kategorie se označují RX1e. [54] [55]

Jako téměř u každé z nejvyšších kategorií motorsportu má tento šampionát také níže postavenou třídu FIA RX2e Championship. Ta funguje především jako doprovodná část při závodech RX1e a pro mladší jezdeckou generaci z hlediska vstupu do závodního prostředí nebo získání prvních zkušeností s elektrickými vozy. Paradoxně však díky zpoždění začátku hlavního šampionátu proběhla první sezóna této podkategorie již v roce 2021. [54]

Pro srovnání jsou uvedeny specifikace vozů obou těchto kategorií.

### **2.3.2 TECHNICKÉ SPECIFIKACE ZÁVODNÍHO VOZU**

#### **RX1E**

Hlavní kategorie WRX je uzpůsobena z hlediska technologických specifikací podobně jako v některých dalších elektrických kategoriích motorsportu. Týmy mohou vyvíjet pouze komponenty nesouvisející přímo s hlavním pohonnou jednotkou vozu dodávanou pořadatelsky stanoveným výrobcem. Do volitelných dílů se neřadí dvě MGU, měnič a bateriový systém společně s nabíjecí sadou a softwarem. Celkem za tyto komponenty a 4letou technickou podporu zaplatí stáje pořadatelé přes 10 milionů Kč. [55] [56]

Týmům je umožněno přidání dalších ocelových rámu pro upevnění nových společných komponent elektrického pohonu a jeho součástí. Původní tak zůstala především ocelová karoserie s prvky jako kapota, zavazadlový prostor nebo dveře spolujezdce, které lze nově pro snížení váhy možné navrhnout z kompozitních materiálů. Celkově jsou vozům ponechány podoby některých předešlých modelů automobilových výrobců soutěžících v minulých sezónách. Mezi konkrétní zástupce se řadí například Lancia Delta Evo-e nebo Peugeot 208 RX1E. Počátečním testovacím vozem byl však zvolen model Fabia automobilky Škoda Auto v upravené verzi RE-X1. [55] [56]



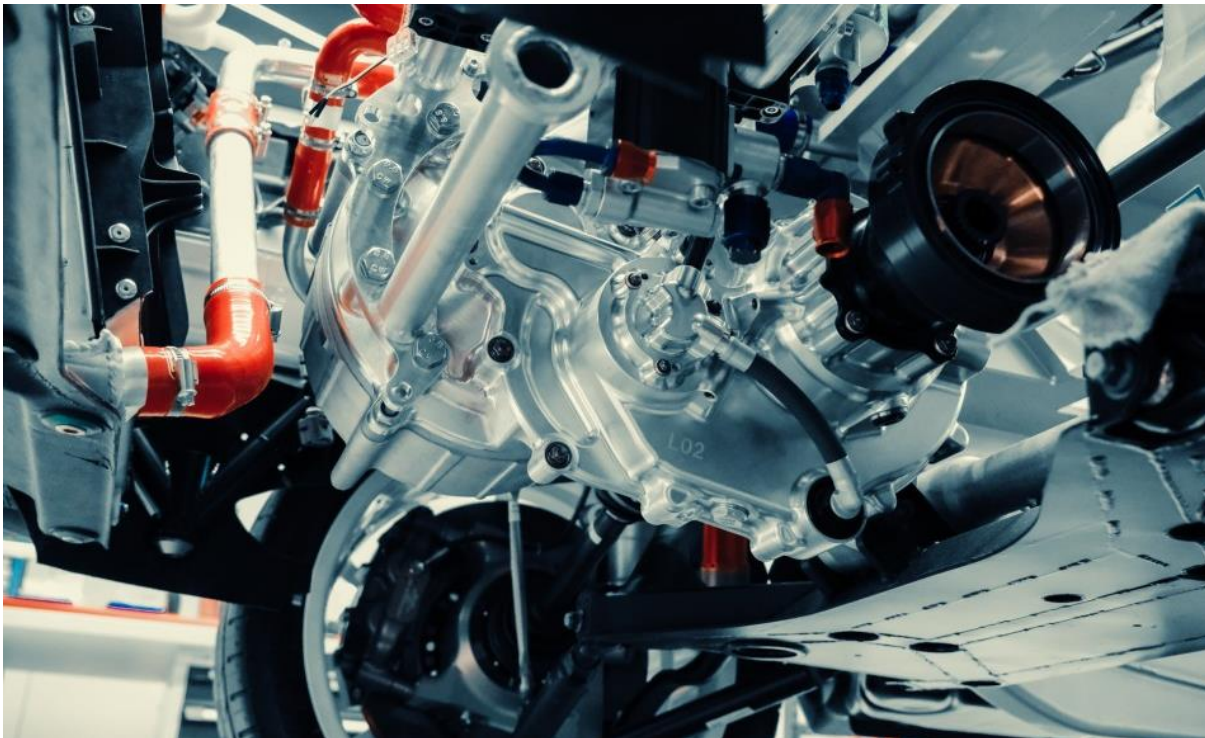
Obr. 25 Testovací prototyp – Škoda RE-X1 [55]

Všechny vozy využívají shodnou baterii o kapacitě 52,65 kWh a napětí 860 V s maximálním nabíjecím výkonem 60 kW od Kreisel Electric. Vysoký výkon je umožněn díky navrženému chladicímu systému, který je tvořen speciální kapalinou s vysokou hodnotou odvodu tepla, v níž je baterie plně ponořena. Pro nabíjení je použita energie uchovaná ve speciálních kontejnerech o kapacitě až 900 kWh. Celková hmotnost systému baterie je tak téměř 330 kg. Odlehčení zajišťují také krycí vrstvy tvořené z uhlíkových vláken a dalších ochranných vrstev chránících proti požáru nebo nárazu. Rozložení je uzpůsobeno po téměř celé délce vozu, takže výsledné zatížení náprav je téměř identické. [55] [56]



Obr. 26 Bateriový systém RX1e [57]

Pohon vozu je tvořen dvojicí identických MGU na každé nápravě bez vzájemného propojení. Každá z nich má výkon 250 kW (o 35 kW na motor více než u předchozí benzínové verze) a točivý moment až 880 Nm. To umožňuje vozu o hmotnosti téměř 1400 kg zrychlení z 0 na 100 km.h<sup>-1</sup> za 1,8 s což je méně, než dokážou mnohem lehčí modely Formule 1 se spalovacím motorem. Samotná pohonná jednotka používá technologii rotoru obaleného uhlíkem. Následný přenos na kola je distribuován samosvorným diferencialem s nastavitelným předpětím. Technologicky uzpůsobený je také měnič s méně než 0,5 % ztrátovostí účinnosti tvořený z karbidu křemíku a nízkou hmotností pod 6 kg. [55] [56]



Obr. 27 Přední hnací ústrojí vozu kategorie RX1e [56]

Z dalších částí vozu je možné zmínit například nastavitelná zadní přitlačná křídla a samotné rozměry vozů, které jsou dle volného vývoje jednotlivých karosérií různé. V případě modelu Peugeot 208 RX1E je to 3,965 × 1850 × 1380 mm. [58]

## RX2E

Nižší kategorie WRX sdílí specifikacemi stejné vozy pro všechny účastníky bez rozdílu. Jejich základní rozměry jsou 4,05 × 1,8 × 1,5 m. Vnější tělo je tvořeno téměř celé z kompozitních materiálů pro dosažení nízké hmotnosti a dobré odolnosti. Hlavní ochranou složku tvoří základní trubkový rám z vysokopevnostní oceli s příměsí chromu a molybdenu, která přináší vysokou pevnost v tahu. Deformační zóny v přední a zadní části jsou poté tvořeny konstrukcemi ze slitiny hliníku. Celkově tak vůz i s jednočlennou posádkou dosahuje minimální hmotnosti pod 1330 kg. To je o více než 70 kg více než předchozí modely této kategorie se spalovacími motory především z důvodu zákazu využití lehčích materiálů na některé z částí karoserie jako v případě RX1e. [55] [59]



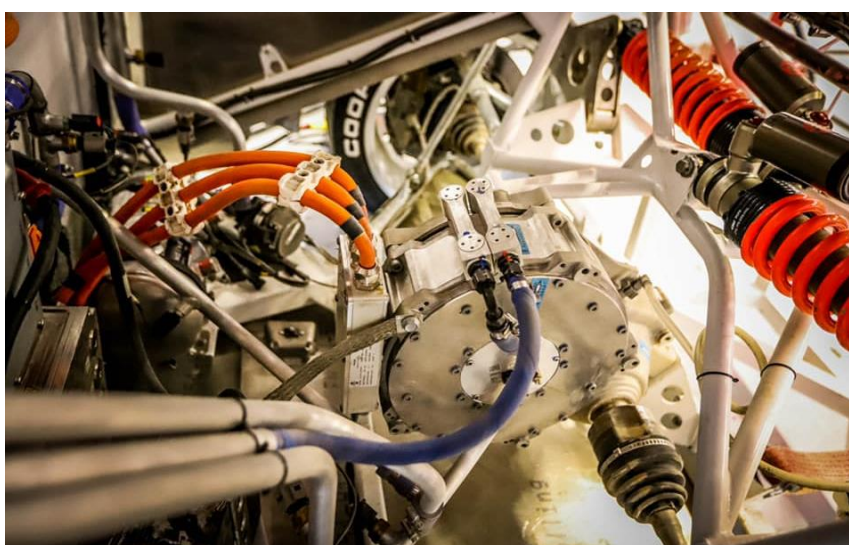


Obr. 28 Základní vnější podoba vozu RX2e [60]

Pro uchování energie je uzpůsoben RESS systém s kapacitou lithium-iontových článků až 30 kWh, který byl ve třetí sezóně vylepšen na 33 kWh. Jeho hlavní předností je především napětí 750 V a dlouhá výdrž s minimálními ztrátovými hodnotami kapacity a výkonu i přes vysoký počet provedených nabíjecích cyklů v průběhu šesti let testovacího používání. Dostatečná rychlost nabíjení s výkonem až 50 kW je umožněna díky průběžnému chlazení baterie dielektrickou kapalinou. V základu tak umožňuje snížit dobíjecí čas až na 30 minut a dojezd v běžných podmínkách činí přes 200 km. V závodním režimu je to ale pouze kolem 16 měřených kol, tj. asi 18 km. Hlavním důvodem je výkonové zaměření baterie na úkor kapacitních možností jako v běžných aplikacích ev. Hmotnostně poté tvoří s 255 kg až 20% celkové váhy vozu. [59] [61]

Každá náprava je poháněna jedním elektromotorem QEV Technologies. Ten dosahuje jednotlivě výkonu až 186 kW s kroutícím momentem 232 Nm a maximem 12 500 ot.min<sup>-1</sup> (celkem poté 270 kW a 510 Nm). Vysoká účinnost přes 96 % společně s hmotností 23,5 kg znamená maximální rychlost až 165 km.h<sup>-1</sup> se zrychlením z 0 na 100 km.h<sup>-1</sup> za 3,3 s. [54] [62]

Rozvod momentu na kola je pro každý elektromotor zajištěný pomocí reduktoru a samosvorného diferenciálu, které umožňují softwarové nastavení pro výkon a točivý moment jednotlivých náprav. Maximální složený výkon obou elektromotorů lze krátkodobě navýšit v určitý okamžik závodu až o dalších 80 kW což je jeden z volitelných taktických prvků závodů společně s nastavením procentuální rekuperace energie. [54] [63]



Obr. 29 Zadní MGU na voze RX2e [62]

### 2.3.3 FORMÁT ZÁVODŮ A PRAVIDLA

V této části jsou zmíněny pouze aspekty ze sportovních [64] a technických předpisů [65], které nějakým způsobem ovlivňují fungování vozu a jeho výkon nebo udávají představu o specifikacích vozů či tratích na kterých se vůz pohybuje.

#### SPORTOVNÍ PŘEDPISY

Každý soutěžní podnik mistrovství trvá dva dny a obsahuje formát 4 rozjížděk, 2 semifinále a 1 finále s maximálně 5 koly a 6 závodníky postavenými na startu. Do celkového bodování soutěže se počítají body ze semifinále i finále.

#### TECHNICKÉ PŘEDPISY

Není možné provádět žádné dodatečné úpravy na MGU, RESS systému a měničích.

Z hlediska rekuperace je horní hranice výkonu omezena na součet 80 kW z obou náprav.

Maximální výkon z RESS systému dodávaného MGU je stanoven v běžném závodním režimu na 270 kW s podmínkou maximálního rozdělení mezi nápravy v poměru 5:4. V případě režimu Power Boost s výkonem 350 kW je to poměr 4:3.

Na součásti vozu není umožněno využívat speciální materiály jako slitiny titanu nebo hořčíku.

## 2.4 ELEKTRICKÉ MODELY OTEVŘENÝCH SÉRIÍ

Elektrický pohon v posledních letech dosahuje vysokých technologických pokroků. Došlo tak ke vzniku několika čistě elektrických nebo hybridních modelů, které v otevřených sériích mohou soutěžit proti spalovacím motorům. [66]

Níže tak byly popsány modely dvou vozů soutěžících v otevřených kategoriích světového motorsportu.

### 2.4.1 VOLKSWAGEN I.D. R PIKES PEAK

Vůz byl poprvé závodně testován v polovině roku 2018. K prvním zmínkám o vytvoření tohoto čistě elektrického modelu došlo ale již na konci roku 2017. Model automobilky Volkswagen byl vytvořen především s cílem překonat rychlostní rekord závodu Pikes Peak International Hill Climb (PPIHC) a rekordy dalších závodních měřených okruhů. [67]

PPIHC je druhý nejstarší závod v USA fungující již od roku 1916. Na délku měří téměř 20 km a během jízdy je nutné projet více než 156 zatáček. Hlavní výzvou pro vozy naskytá především poloha tratě, kdy se start nachází ve výšce 2862 m n.m. a převýšení k cíli činí cca 1438 m. První elektrické vozidlo se na trať dostalo již v roce 1981, ale poprvé dokázal elektricky poháněný vůz s názvem '15 e0 PP03' zvítězit až v roce 2015. [68] [69]



Obr. 30 Trasa závodu PPIHC [70]

### TECHNICKÉ SPECIFIKACE VOZU

Model je v PPIHC řazen do kategorie Unlimited, která po stránce pravidel poskytuje maximální volnost z hlediska technických specifikací vozů. Takřka jedinou podmínkou je tak, aby vůz disponoval dvěma nápravami s celkem čtyřmi koly. Již při svém prvním nasazení v roce 2018 stanovil stále trvajícím rekord tratě v čase těsně pod 8 minut, což v přepočtu znamená průměrnou rychlost cca  $150 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  po celé její délce. Celkové rozměry vozu jsou  $5,2 \times 2,35 \times 0,98 \text{ m}$ . [67] [71]

Hlavní ochrana je tvořena ocelovým rámem s tím, že řidiče samotného chrání karbonový monokok. Maximální šířka vozu je dána zadním spoilerem, který udržuje vůz na vozovce díky dostatečnému přitlaku. K tomu dopomáhají speciální tvary karbonové karoserie kolem kol po vzoru vozů Formule 1, které generují přídavnou sílu pro lepší trakci a systém DRS pro snížení odporu. [72] [73]



Obr. 31 Boční zobrazení s výrazným zadním spoilerem [73]



RESS systém dokáže uchovat až 40 kWh energie a pracuje s napětím 915 V. Skládá se celkem ze dvou lithium-iontových bateriových sad vážících přes 250 kg, které mají vysokou hustotu energie (po hmotnostním přepočtu kolem  $290 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Ty se nacházejí kvůli váhovému poměru částečně vedle řidiče i za ním. [72] [74]

Pro dosažení nejnižší možné hmotnosti nedisponuje vůz externím chlazením bateriového systému. Ochlazování je dosaženo úpravou průtoku vzduchu skrz vozidlo kolem právě bateriového systému (teploty nad  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  totiž výrazněji jeho snižují výkon) nebo dalších teplo generujících částí jako jsou měniče nebo MGU. Krátkodobá extrémní výkonová zatížení však znamenají nízkou životnost jeho článků. Maximální nabíjecí výkon 90 kW jednotlivě pro každou sadu umožňuje nabít vůz v časovém intervalu 20 minut což je rámec, který v PPIHC omezují pravidla. [72] [75]



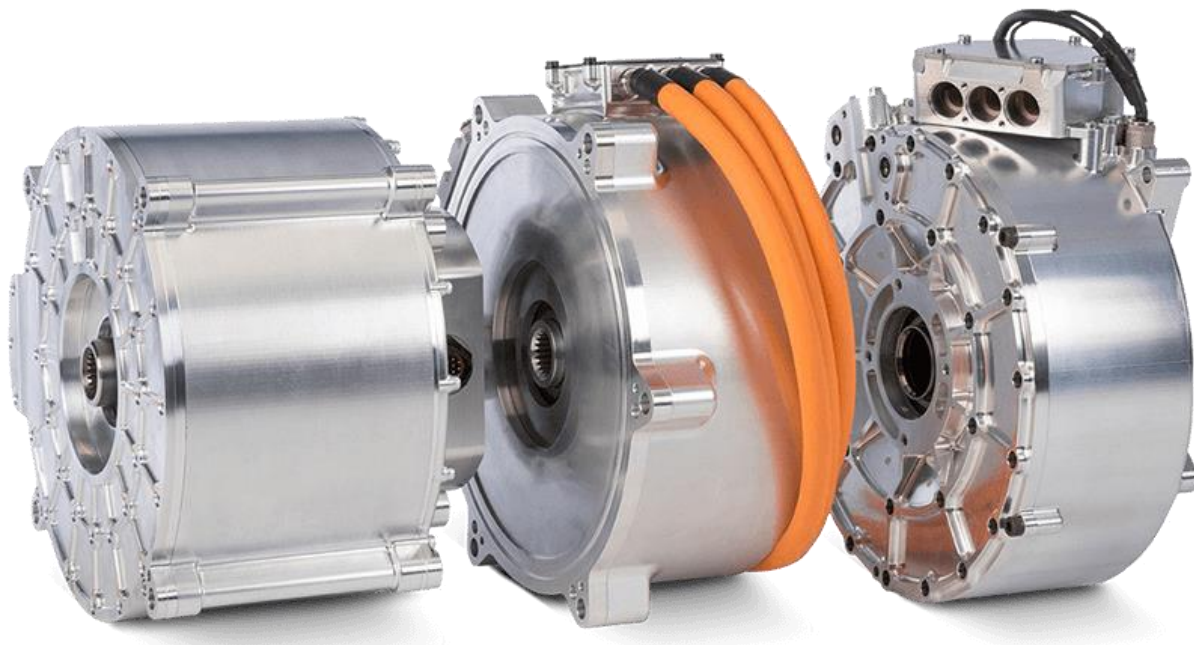
Obr. 32 Poziční umístění bateriového systému vozu [72]

Každá náprava vozu je poháněna jedním elektromotorem verze SPM242 od společnosti Integral Powertrain. Celkový výkon 500 kW je rozdělen v poměru 40:60. Přední motor dosahuje hmotnosti 18,7 kg a hustoty točivého momentu kolem  $15 \text{ Nm}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Zadní motor o stejné konstrukci, ale větší jednotce má hmotnost kolem 23,7 kg a hustotu točivého momentu  $20 \text{ Nm}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Motory v kombinaci s měničem mají vysokou účinnost přes 97 %. S celkovou hmotností 1100 kg včetně váhy řidiče dokáže vůz vyvinout maximální rychlost  $273 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (v provedení pro PPIHC  $220 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) se zrychlením z 0 na  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  za 2,25 s a točivým momentem 650 Nm. [72] [76]

Obě pohonné jednotky lze také použít pro zpětné generování energie ve formě rekuperačního brzdění, které má konkrétně návratnost až 20 %. Použití elektromotorů ve vyšších nadmořských výškách nabízí také výraznou výkonovou výhodu oproti klasickým spalovacím motorům. Ty trpí z hlediska řídkého vzduchu, jenž snižuje účinnost při nasávání do



spalovacích komor motoru. Pro elektromotor znamenají tyto podmínky především problémy spojené s chlazením v obou částech vozu i bateriového systému. Stejně elektromotory pohánějí také produkčně dostupný Aston Martin Rapide E. [74] [76]



Obr. 33 Platformy elektromotorů SPM242 [77]

#### 2.4.2 PORSCHE 919 HYBRID

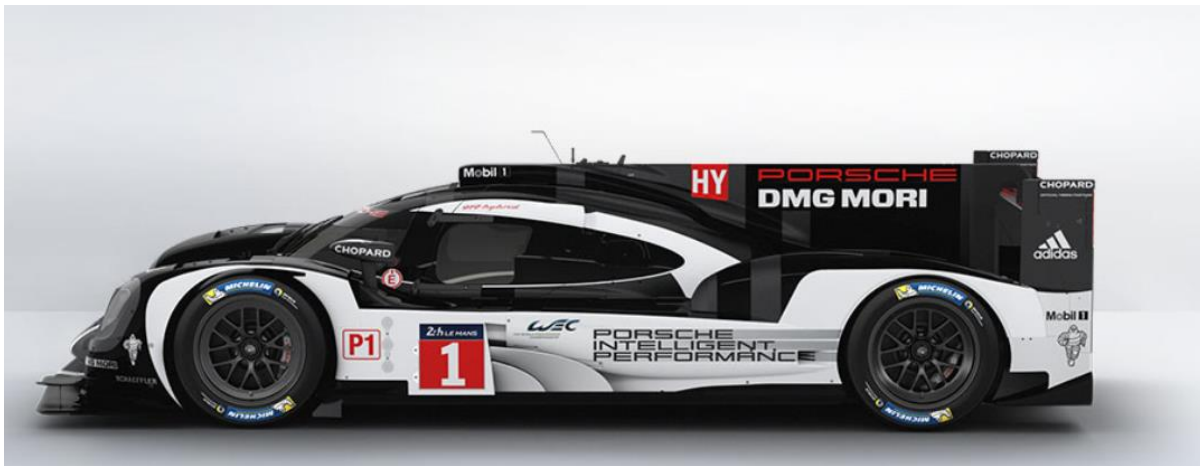
Hybridní modelová verze vozu vytvořená již v roce 2014 pro kategorii LMP1 (nyní Hypercar), která je součástí hlavní série mistrovství světa sportovních vozů (WEC). Prošla celkem 4 generacemi s konečným nahrazením řadou 919 Evo v roce 2018, která je nerychlejším vozem na světě s časem na kolo dle měření na německém okruhu Nürburgring. [78] [79]

WEC je série několika vytrvalostních závodů pořádaných na světových závodních okruzích. Délka těchto okruhů je podmíněna předem stanoveným časovým limitem, po kterém rozhodují o výsledcích pořadí počty odjetých závodních kol. V závislosti na konkrétních podnicích jsou tyto časové limity stanoveny v rozmezí 6 hodin (okruh v Monze) až 8 hodin (okruh v Bahrajnu). Poslední závodní klání má speciální časový úsek 24 hodin (závod Le Mans). [80]

#### TECHNICKÉ SPECIFIKACE VOZU

Vůz v základní specifikaci 911 spadal do kategorie LMP1 (fungující do roku 2018), která byla z hlediska pravidel benevolentnější. Nejdůležitějším tak byla výkonová a hmotnostní omezení a rozřazení vozů dle využitelné elektrické energie na jedno kolo závodního okruhu Le Mans. Nejnižší hranicí byly 2 MJ, nejvyšší, do které spadal i tento vůz bylo 8 MJ. U dalších okruhů podniku docházelo k přepočtům této energie v závislosti na délce jejich kola. [78] [81]

Materiál karoserie vozu byl tvořený z kompozitních materiálů. Konkrétně se jednalo o uhlíková vlákna tvrzená vnitřním hliníkovým jádrem. Celkově byl vůz u každé generace laděn pro dosažení nejnižších aerodynamických odporů a dostatečného chlazení při průchodu vzduchem vozem. Z hlediska různorodosti jednotlivých podniků měl až 3 aerodynamické balíčky. Celkové rozměry vozu byly  $4,65 \times 1,9 \times 1,05$  m společně se suchou hmotností 875 kg. [78] [82]



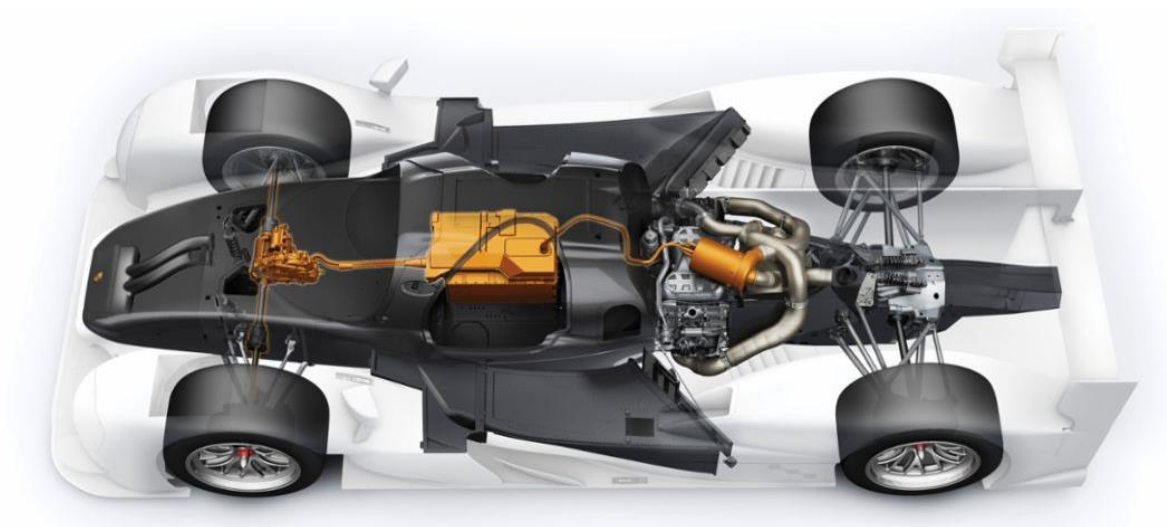
Obr. 34 Boční pohled na 2. generaci Porsche 919 Hybrid [78]

Pro bateriový systém bylo zvoleno uspořádání se stovkami válcových kapslí s lithiium-iontovými články uvnitř a okolním chlazením dielektrickou kapalinou. Celkově tak disponoval maximálním napětím 800 V. Pro závodní použití v kombinaci s hybridním nastavením bylo nutné, aby články měly správný energetický poměr. Konkrétně se jednalo o poměr mezi konkrétní hustotou energie, která charakterizuje možnosti jejího ukládání z hlediska kapacity a výkonovou hustotou, jež značí průchodnost energie z hlediska vybíjení a nabíjení. [83]

Kapacita není z vývojových důvodů přesně charakterizována na rozdíl od maximálních limitů pro spálené kapalné palivo a využitelnou energii na kolo. Z maximální vrácené rekuperované energie na kolo je možné odvodit, že musela mít hodnotu přes 2,3 kWh. Z hlediska nejdelšího závodního klání Le Mans tak dokázala zpětně získat a využít až 773 kWh energie (348 kol). Takto vysoké kapacitní hodnoty by nedokázala dosáhnout žádná technologie baterií při zachování hmotnostních omezení vozu tak, aby mohlo být vozidlo poháněné pouze elektromotory. [81]

Hybridní pohon byl zajištěn hlavní pohonnou jednotkou ve formě zážehového motoru V4 o výkonu 368 kW a jedné jednotky MGU o výkonu 294 kW. Zadní náprava byla poháněna čistě spalovacím motorem s turbodmychadlem, který fungoval jako jedna ze dvou možností rekuperace energie. Konkrétně se jednalo o systém využívající přebytečnou termodynamickou energii, která by byla nadbytečná pro turbodmychadlo. Výfukové plyny byly namísto vypouštění usměrněny na turbínu, jež poháněla generátor elektrické energie pro baterii. Produkovala tak až 40 % z celkové rekuperované energie, a to i při akceleraci motoru. Druhým způsobem byla rekuperace při brzdění, kdy se podobně jako u klasických MGU energie získávala odporem při otáčení rotoru. Množství této kinetické energie bylo tak závislé na charakteru zatáčky a počáteční rychlosti se kterou do ní vůz najížděl. V druhé polovině při výjezdu ze zatáček vůz využil část uložené energie k posílení výkonu spalovacího motoru a

ke kratšímu dosažení maximální rychlosti. Ta tak byla u modelu 911 přes  $320 \text{ km.h}^{-1}$  s maximálním zrychlením z 0 na  $100 \text{ km.h}^{-1}$  za 2,2 s. [81] [83]



*Obr. 35* Podoba a umístění hybridní jednotky a rekuperace ze spalovacího motoru [83]

### 3 MODELOVÉ POROVNÁNÍ KONCEPTŮ V KATEGORII T1

Koncepty T1 (ULTIMATE) nabízí jako v dalších kategoriích motorsportu rozsáhlé možnosti z hlediska návrhu. Pro srovnání byly proto vybrány 4 vozy napříč touto kategorií. Hlavním rozdílovým faktorem tak jsou různá zařazení v rámci podkategorií, rozličné typy pohonných ústrojí s vlastní účinností, množství poháněných náprav a pohonná média se stanoveným objemem a energetickou hustotou. Tím by tak mělo být dosaženo dostatečně širokého srovnání v rámci rozsáhlého počtu zástupců.

Díky množství těchto koncepcí je možné vytvořit ucelený způsob, který dokáže vozy efektivně srovnat především ve vztahu k energetické kapacitě čistě elektrického pohonu a vyjádřit jeho výkonnostní schopnosti. Číselně a procentuálně je tak porovnávána hmotnostní změna, která by pro toto vozidlo byla nutná za podmínky využití maximálních dostupných zásob energie ve velikosti průměru dalších konceptů. Toho je dosaženo srovnáním účinností a spotřeb paliva jednotlivých pohonů s přihlédnutím k faktorům náročných podmínek charakteristických pro tuto závodní kategorii.

#### 3.1 POPIS KATEGORIE T1 A OMEZENÍ VOZŮ

Kategorie T1 spadá konkrétně dle FIA do skupiny oficiálně nazvané jako Cross Country Rally. Vozy této kategorie jsou vyrobené v kusové výrobě a uzpůsobené výhradně pro soutěžní použití. [84] [85]

Díky široké škále jednotlivých specifikací vozů došlo k rozdělení skupiny T1 na 7 podkategorií. Ty by měli zajistit lepší konkurenceschopnost a snížení rozdílů napříč celou kategorií. Nejvýkonnější vozy jsou zástupci kategorie T1+, která upravuje především minimální hmotnostní limity a povolené rozměry vozu. Do kategorie T1U se zase přesunuly vozy využívající jiný než spalovací motor jako primární nebo jediný způsob pohonu. [86]

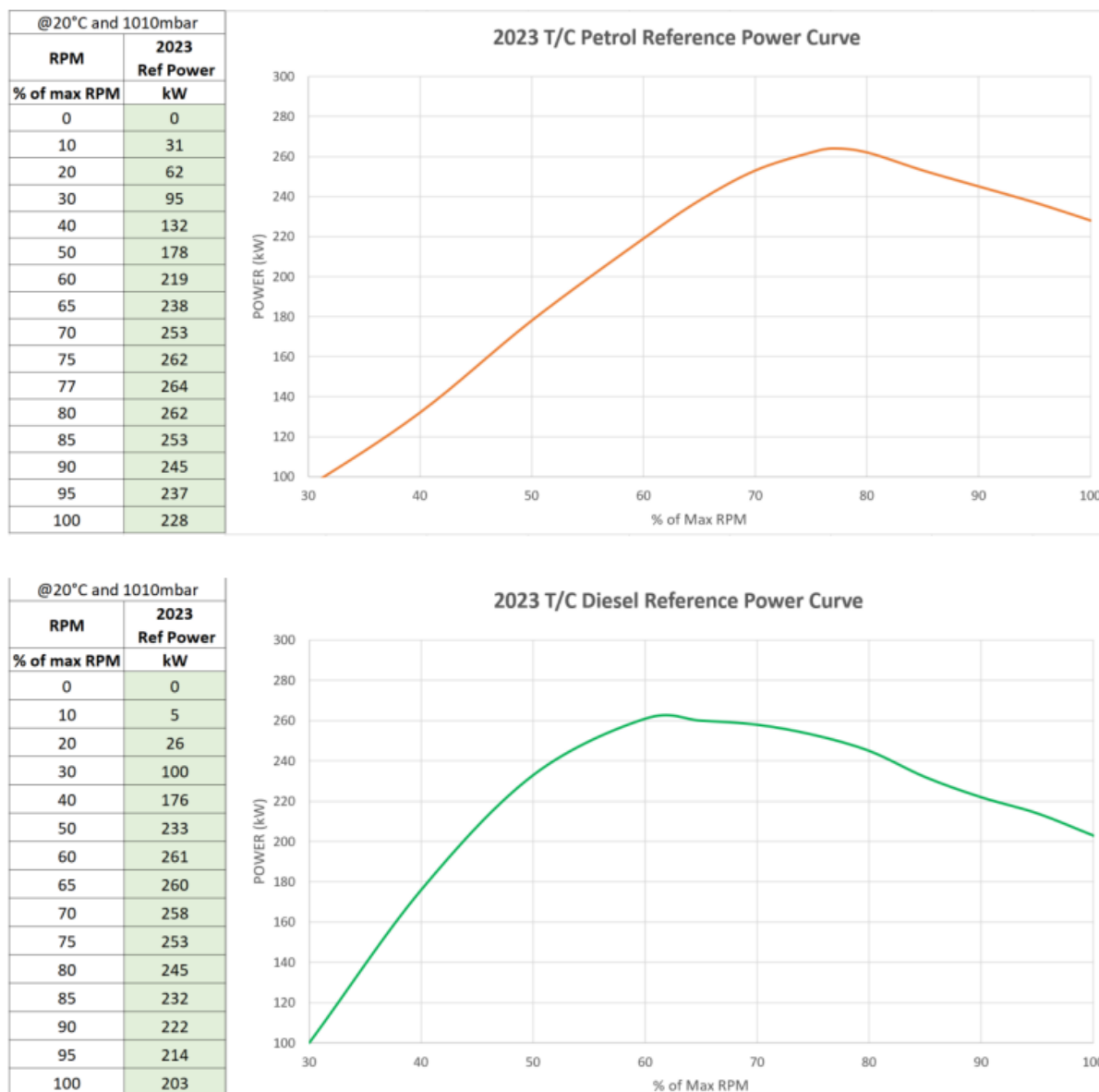
Hlavní technická omezení kategorie jsou uvedena především s ohledem na zásadní součásti, které se váží k pohonu vozu nebo jsou dále jedním z omezení pro výpočet.

Hustota paliva použitá pro pohon soutěžních vozů se musí nacházet v předepsaném rozmezí. Pro benzin je to  $720\text{--}785\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a pro motorovou naftu  $820\text{--}845\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [87]

Při použití přeplňovaného čtyřdobého motoru je nutné základní objem válců násobit koeficientem 1,7. Vůz poté podléhá v dalším znění platným pravidlům pro takto vytvořený objemový výsledek. [88]

Minimální hmotnosti vozů jsou udávány v jednotlivých podkategoriích (T1.X, T1+ a T1U) a dle typu jeho paliva, počtu poháněných náprav a celkovému objemu válců. V podkategoriích T1.X je to postupně pro pohon 4×2 a 4×4 u naftových motorů nejvíce 1580 a 2000 kg a u benzinových 1580 a 1850 kg. V kategorii T1+ to je dle paliva ve verzi pouze 4×4 2040 kg pro naftové přeplňované a 2010 kg pro benzinové motory. V případě T1U je to poté pro všechny vozy shodná hmotnost 2100 kg. Vozy kategorie T1U mohou mimo média pro hlavní pohon (bateriové články, vodík a další) vést až 340 litrů kapalného média pro spalovací motor. Maximální společný výkon elektromotorů nesmí překročit 281 kW s možnou odchylkou 2 %. [89]

Motory v kategorii T1 nemohou poskytovat vyšší výkony než maxima stanovená regulací FIA. Ty jsou interpretována dle výkonových křivek s přihlédnutím k použitému druhu paliva viz Obr. 36. [90]



Obr. 36 Výkonové křivky na základě pohonného média [90]

### 3.2 TECHNICKÉ PARAMETRY POROVNÁVANÝCH VOZŮ

#### 3.2.1 VOZIDLO 1 – TOYOTA HILUX DAKAR EVO

První vybraný vůz, který byl zvolen pro srovnání je model Toyota Hilux DKR ve verzi EVO, která byla vydána pro rok 2024. Jedná se o SUV patřící do kategorie T1+ s benzínovým motorem a pohonem obou náprav. Maximální suchá hmotnost je tak dle regulí FIA stanovena na 2010 kg. Základní rozměry vozu jsou 4,81 × 2,3 × 1,89 m. [91]





Obr. 37 Přední a boční pohled na vůz Toyota Hilux Dakar EVO [91]

Vůz pohání zážehový benzínový motor V35A o objemu 3,4 litrů upravený dle předepsaných pravidel FIA ze sériového vozu Land Cruiser 300. Vidlicový šestiválec s dvěma turbodmychadly dokáže vyvinout výkon až 264 kW při otáčkách kolem 5300 ot.min<sup>-1</sup> s točivým momentem až 620 Nm. Přenos výkonu na obě poháněné nápravy zajišťuje sekvenční převodovka se šesti převodovými stupni, keramická spojka se dvěma lamelami a samosvorné diferenciály v přední, mezinápravové i zadní části. Maximální rychlost je poté dle regulí stanovena na 210 km.h<sup>-1</sup>. Z hlediska paliva využívá vůz palivovou nádrž s objemem 540 litrů s bezpečnostní ochranou FT3. [91] [92]

Vůz je doplněn o celokompozitní karoserii a dvojité lichoběžníkové zavěšení náprav. [93]

### 3.2.2 VOZIDLO 2 – PEUGEOT 3008 DKR MAXI

Druhý koncept se spalovacím motorem, který nejprve v roce 2017 vyšel z přechodí SUV generace Peugeot 2008 DKR. V nejnovějším provedení poté od roku 2018 přešel rozměry do verze Maxi. Jedná se o závodní provedení s naftovým motorem a pohonem pouze zadní nápravy. Proto se řadí do kategorie T1.2, což znamená výhodu z hlediska váhových limitů, které jsou pro kategorii 4×2 benevolentnější než v případě hybridu nebo benzínových motorů. Vůz má tak minimální stanovenou hmotnost 1580 kg. Hlavní rozměry ve verzi Maxi jsou 4,312 × 2,4 × 1,799 m. [89] [94]



Obr. 38 Přední a boční pohled na vůz Peugeot 3008 DKR Maxi [95]

Výkon vozu zajišťuje uprostřed umístěný třilitrový naftový motor V6 s přímým vstřikováním a dvěma turbodmychadly. Ten dokáže vyvinout výkon až 254 kW, točivý moment 800 Nm a pracuje kolem 5000 ot.min<sup>-1</sup>. Motor je v základním uspořádání 60° V6 schopen poskytnout dalších 15 kW výkonu. Změna průměru sací příruby v motoru z 39 na 38 mm s ohledem na závodní předpisy v roce 2016 však toto navýšení neumožnila. Pro pohon zadní nápravy se zde nachází podélně uložená manuální šestistupňová sekvenční převodovka a hydraulický posilovač řízení. Vůz tak dokáže vyvinout maximální rychlost i ve zhoršeném terénu kolem 200 km.h<sup>-1</sup>. Pro dlouhé etapy je poté vybaven 400 l nádrží na závodní palivo. [94] [96]

Z dalších částí je možné zmínit nastavitelné dvojitě tlumiče umožňující zdvih až 460 mm, lehkou kompozitní karoserii z uhlíkových vláken nebo trubkový ocelový rám. [97]

### 3.2.3 VOZIDLO 3 – AUDI RS Q E-TRON

Pro srovnání více použitých konceptů vozu byl vybrán zástupce hybridní varianty. Audi RS Q e-tron funguje v první koncepční verzi od roku 2017. Druhá varianta E2 se poté od roku 2023 účastnila také Rally Dakar. Jedná se o plug-in hybridní verzi postavenou na základním konceptu vozu Formule E. Je tak z hlediska regulace zařazena do podkategorie alternativních pohonů T1U s maximální vahou 2100 kg a pohonem všech čtyř kol. Celkové rozměry vozu jsou 4,67 × 2,3 × 1,95 m. [98]



Obr. 39 Přední a boční pohled na vůz Audi RS Q e-tron E2 [99]

Ve voze se nachází celkem 4 motory. Pohon zajišťuje kombinace 2 stejných elektromotorů Audi MGU05 na každé nápravě. Jedná se o šestifázový elektromotor, který využívá vnitřní rotor společně s permanentními magnety. Celá MGU se pak skládá ze samotného motoru, měniče napětí a připojeného chladicího systému. Použití lehkých materiálů a vhodné uspořádání tak přináší nízkou hmotnost 35 kg a vysokou účinnost až 97 %. Výkon jednoho elektromotoru je poté až 250 kW. Kombinací na obou nápravách je jejich celkový součet přes 500 kW, ale při omezení regulací kategorie na např. Rally Dakar je možné využít pouze 286 kW. Přenos energie na dvojice kol pak na každé nápravě zajišťuje jednostupňová převodovka s diferenciálem. Ten umožňuje posádce volitelné rozdělení točivého momentu o velikosti až 640 Nm. [100] [101]

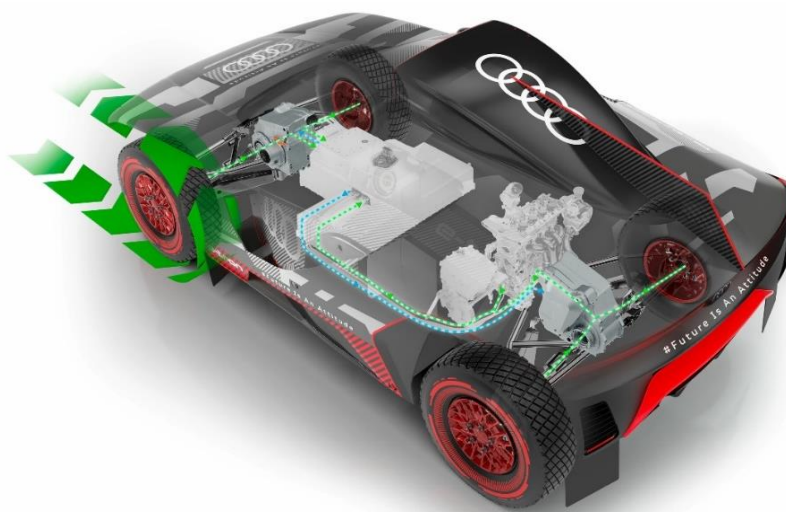
Totožný MGU funguje opačně, tedy jako generátor energie pro bateriový systém. Je proto přes hnací hřídel spojen přímo s benzínovým motorem Audi RC8 TFSI I4. Čtyřválcový přeplňovaný turbomotor s přímým vstřikováním umožňuje nastavitelné rozmezí jak otáček (nejčastěji kolem  $5250 \text{ ot. min}^{-1}$ ), tak točivého momentu. Dle regulí však není možné využít jeho maximálního výkonu až 440 kW kvůli omezení nejvyššího měřeného průchodu energie přes měnič, který je stanoven jeho výkonem na 220 kW. Pro kapalně médium je maximální kapacita nádrže 340 l, ale množství je v některých seriálech regulováno. [98] [102]



Obr. 40 Jednotka MGU05 [100]

Energie pro pohon vozu představuje 52 kWh baterie. Vysokonapěťový bateriový systém tvořený lithiem-iontovými články je uzpůsobený pro mnohačetné a rychlé vybíjení. Během etap je ale nutné neustále propočítávat aktuální míru vybíjení vzhledem k vyššímu výkonu oproti možnému nabíjení skrze měnič. Vůz tak není schopný dlouhé vzdálenosti nebo vysoká převýšení projíždět konstantně nejvyšší maximální rychlostí  $170 \text{ km.h}^{-1}$  a zrychlení z 0 na  $100 \text{ km.h}^{-1}$  za 4,5 s. Systém společně s chladicí kapalinou a odolným ochranným pláštěm váží více než 370 kg. Reálně tak mají samotné články hmotnost méně než 230 kg. [101] [103]

Z hlediska dalších komponent je možné zmínit ocelový rám vyztužený kompozitními prvky, dvojité lichoběžníkové zavěšení s nezávislým odpružením obou náprav nebo elektronicky řízený rekuperační brzdový systém. [101]



Obr. 41 Energetické okruhy pro jednotlivé MGU [104]



### 3.2.4 VOZIDLO 4 – ACCIONA 100 % EcoPOWERED

Model, který byl zvolen pro porovnávání s třemi předchozími vozidly. Jedná se o první čistě elektrický vůz, který se již v letech 2015 až 2017 účastnil Rally Dakar. Spadá do kategorie T1U, tedy alternativních pohonů s maximální hmotností vozu 2100 kg a s pohonem obou náprav. Základní rozměry vozu jsou  $4,6 \times 2,0 \times 1,8$  m. [105] [106]



Obr. 42 Přední pohled na vůz ACCIONA [107]

Pohon je zajištěn jediným synchronním elektrickým motorem AM Racing s výkonem až 250 kW. Ten pracuje v rozmezí 2 500 až 10 000 ot.min<sup>-1</sup>. společně s točivým momentem 800 Nm a celkovou maximální vahou kolem 55 kg. Jeho energie je přenášena na kola za pomoci šestistupňové sekvenční převodovky. V základní odhadované energetické variantě se počítá se spotřebou mezi 20 až 45 kWh/100 km. Ta však může při náročných podmínkách dále extrémně narůstat, protože uvedený dojezd počítá pouze se vzdáleností pod 200 km, a přitom maximální rychlostí jen 150 km.h<sup>-1</sup>. [106]

Hlavní bateriový systém se skládá ze šesti lithium-iontových článků, které jsou celkově složeny z 15 840 menších baterií a rozděleny jsou do předních, prostředních a zadních celků ve voze v poměru 1:1:2. Baterie s chladícím systémem a její další přídatnou elektronikou zaujímají hmotnost až 920 kg a poskytují maximální kapacitu téměř 150 kWh. Velmi rychlé nabíjení je zajištěno díky možnosti dobíjet každý článek samostatně. Třífázová nabíječka využívá napětí 220–415 V a proud 16–32 A. Druhou možností, která však nepředstavuje vysokou návratnost energie je fotovoltaický panel z uhlíkových vláken na zadní straně střešního prostoru. Zaujímá plochu až 250 cm<sup>2</sup> a přivádí maximální generovanou energii do baterie s výkonem 100 Wh při napětí 12 V. Proto je tato energie použita spíše jako zdroj pro množství elektronických ovládacích součástek a vybavení uvnitř. Vozidlo dokáže využít rekuperovanou energii motoru, kterou je možné zpětně dobíjet bateriový systém s návratností až 15 %. [106] [108]

Mezi další důležité součásti vozu se řadí plně regulovatelné hydraulické odpružení nebo karosérie z uhlíkových vláken. [108]

### 3.2.5 VÝPOČET A SROVNÁNÍ VSTUPNÍCH HODNOT

Z hlediska porovnání byly vytvořeny 2 určité srovnávací varianty, které interpretují srovnání maximálních energetických zdrojů vozů. Konkrétní zaměření je poté na čistě elektrický pohon vozidla č.4, tak aby dosáhl průměrných hodnot využitelné energie jako u ostatních srovnávaných modelů. Toho je dosaženo díky charakteristice spotřeby motorů jednotlivých zástupců, v podobě možných účinností a ve vztahu k hmotnostem vozu. Účinnosti však není možné získat s dostatečně přesnou mírou vzhledem k závodnímu použití. Pro motory tak byly voleny hodnoty pohybující se v rozmezí blíže vyšším hranicím klasických běžných spotřebitelských vozů. Z hlediska spotřeby jednotlivých vozů byla zvolena charakteristika odpovídající náročnosti podmínek vzhledem k typům použitých motorů a počtu poháněných náprav. Pro obě varianty je započítán stejný hmotnostní poměr článků a baterie viz. Tab. 2.

Tab. 2 Základní zadané parametry v závislosti na technologii sledovaných vozů

Srovnávané vozidlo		Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4
Typ pohonného média	-	benzín	motorová nafta	hybridní (benzín)	elektrická energie
Hustota kapalného paliva	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	752,5	832,5	752,5	-
Hustota energie v kapalném palivu 1	$w_m$ [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	45	44	45	-
Hustota energie v kapalném palivu 2	$w_k$ [kWh·kg <sup>-1</sup> ]	12,62	12,35	12,62	-
Hmotnostní poměr články/baterie	$x$ [%]	-	-	55	55
Hustota energie článků	$w_b$ [Wh·kg <sup>-1</sup> ]	-	-	255,5	296,4

Základním předpokladem výpočtu je požadavek získat celkové energie obsažené ve vozech 1 až 4 z hlediska jejich technických specifikací. K tomu byl použit přepočítání z maximální kapacity nádrží na kapalné palivo, popřípadě bateriového systému dle výše uvedených konstant. Pro hybridní variantu se jedná o součet obsahu paliva pro pohon obou typů motorů. Výsledky těchto výpočtů pomocí rovnic 1 až 3 reflektuje tabulka č.3.

$$m_{k\ 1-4} = \rho_{1-4} V_{1-4}, \quad (1)$$

$$m_{\check{c}\ 3-4} = x_{3-4} m_{s\ 3-4}, \quad (2)$$

$$E_{c\ 1-4} = (w_{k\ 1-4} m_{k\ 1-4}) + (w_{b\ 1-4} m_{\check{c}\ 1-4}). \quad (3)$$



Tab. 3 Výsledky výpočtu hmotnosti paliv a množství energie ve sledovaných vozech

Srovnávané vozidlo		Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4
Typ pohonného média	-	benzín	motorová nafta	hybridní (benzín)	elektrická energie
Objem nádrže	$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,54	0,4	0,34	-
Hmotnost paliva	$m_k$ [kg]	406,4	333,0	255,9	-
Kapacita baterie	$C$ [kWh]	-	-	52	150
Hmotnost systému baterie	$m_s$ [kg]	-	-	370	920
Hmotnost článků baterie	$m_\varepsilon$ [kg]	-	-	203,5	506,0
Celková energie ve voze	$E_c$ [kWh]	5128,1	4112,6	3280,8	150,0

Pro detailnější porovnání, které ukazuje možnosti jednotlivých vozů v počátečních specifikacích bylo započítáno několik ukazatelů.

Konkrétně se jedná o poměry hodnot výkonů, kterých jednotlivá vozidla dosahují ve vztahu k celkovým hmotnostem vozu se započítaným palivem vzhledem k maximálnímu objemu nádrže. Toto srovnání je dále částečně promítnuto do účinností motorů a spotřeby vozů v jednotlivých závodních situacích. Není totiž možné přesně určit tyto účinnosti s ohledem na typ využití, protože se nejedná o běžně dostupný typicky sériově vyráběný motor, ale závodní speciál a tyto informace proto nejsou jednoduše dostupné z důvodu utajení použitého technologického vývoje výrobcem. Hmotnostní limity a další charakteristiky vozů ze základního přehledu nebo výpočtů pomocí rovnic 4 až 6 jsou uvedeny v tabulce č.4. Druhým ukazatelem, který byl použit ve výsledném srovnání jako jeden ze dvou způsobů pro interpretaci výsledků je poměr váhy paliva vůči celkové hmotnosti vozu jako v předchozím případě.

$$m_{c1-4} = m_{k1-4} + m_{v1-4}, \quad (4)$$

$$P_{vm1-4} = \frac{P_{1-4}}{m_{c1-4}}, \quad (5)$$

$$P_{mm1-4} = \frac{(m_{k1-4} + m_{\varepsilon1-4})}{m_{c1-4}}. \quad (6)$$

Tab. 4 Výpočet hmotnostních a výkonových poměrů v základním stavu sledovaných vozů

Srovnávané vozidlo		Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4
Typ pohonného média	-	benzín	motorová nafta	hybridní (benzín)	elektrická energie
Počet poháněných náprav	$p_n [-]$	2	1	2	2
Výkon motoru	$P$ [kW]	264	254	286	250
Hmotnost paliva	$m_k$ [kg]	406,4	333,0	255,9	-
Hmotnost článků baterie	$m_č$ [kg]	-	-	203,5	506,0
Suchá hmotnost vozu	$m_v$ [kg]	2010	1580	2100	2100
Celková hmotnost vozu	$m_c$ [kg]	2416,4	1913,0	2355,9	2100,0
Výkon/celková hmotnost vozu	$P_{vm}$ [kW·kg <sup>-1</sup> ]	0,109	0,133	0,121	0,119
Váha paliva/hmotnost vozu	$P_{mm}$ [%]	16,82	17,41	19,50	24,10

### 3.2.6 SROVNÁVACÍ VARIANTA A

Srovnávací varianta A předpokládá fungování spalovacích motorů ve vyšším průměru dosažitelných účinností pro konkrétní typ paliva se započítáním určitých procentuálních ztrát. Hlavním důvodem je vysoká technologická úroveň pohonu v této sportovní kategorii, která je však ovlivněna dalšími charakteristikami vozu a faktory okolního prostředí. Mezi ně jsou zařazeny dlouhodobý jízdní režim ve vyšších otáčkách, vysoká míra nerovností v průběhu trasy znamenající častou míru zrychlování a zpomalování, ztráty spojené s přenosem síly od motoru na kola, fungování ve velkých teplotních rozmezích a další.

Základní účinnosti byly vztaženy k hodnotám z [111], [112], [113] a [114]. Z hlediska ztrát vozů se spalovacími motory byla zvolena hodnota  $\eta_{v1-2} = 8 \%$  (okolní prostředí, komponenty vozu, valivý odpor, jízdní režim a hnací ústrojí viz [115]). V případě elektricky poháněného vozidla č. 4 jsou ztráty stanoveny na polovinu ztrát spalovacích motorů ( $\eta_{v4} = 4 \%$ ) (menší ztráty pohonu, množství dílů ve voze a jejich účinnosti dle [112]). Pro hybridní pohon je to průměrná hodnota obou typů ( $\eta_{v3} = 6 \%$ ). Dále je připočtena ztráta vlivem  $P_{vm}$  v hodnotě 1 % za rozdíl 0,01 od nejlepšího dosaženého poměru. Účinnosti rekuperačního brzdění elektrických vozů jsou stanoveny na 15 % (konfigurace vozidla č.4). Konstanty, výsledné energie a střední výsledná energie dosažené rovnicemi 7 až 11 jsou zahrnuty v tabulce č.5.

$$\eta_{h1-4} = 100 (P_{vm3} - P_{vm1-4}), \quad (7)$$

$$\eta_{c1-4} = \eta_{z1-4} - (\eta_{v1-4} + \eta_{h1-4} - \eta_{r1-4}), \quad (8)$$

$$E_{v1,2,4} = E_{c1-4} \eta_{c1-4}, \quad (9)$$

$$E_{v3} = (E_{c3} \eta_{p3}) \eta_{c3}, \quad (10)$$

$$E_p = \frac{1}{3} \sum_1^3 E_v. \quad (11)$$

Tab. 5 Výpočet střední výsledné energie sledovaných vozů dle účinností

Srovnávané vozidlo		Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4
Typ pohonného média	-	benzín	motorová nafta	hybridní (benzín)	elektrická energie
Celková energie ve voze	$E_c$ [kWh]	5128,1	4112,6	3280,8	150,0
Základní účinnost pohonu	$\eta_z$ [%]	30,25	38,50	75,25	80,45
Vnitřní a vnější ztráty	$\eta_v$ [%]	8	8	6	4
Výkon/c. hmotnost vozu	$P_{vm}$ [-]	0,109	0,133	0,121	0,119
Hmotnostní ztráty	$\eta_h$ [%]	2,4	0,0	1,2	1,4
Rekuperace energie	$\eta_r$ [%]	-	-	15	15
Celková účinnost	$\eta_c$ [%]	19,85	30,50	83,05	90,05
Účinnost dalších motorů	$\eta_p$ [%]	-	-	35,25	-
Výsledná energie	$E_v$ [kWh]	1017,93	1254,34	960,15	135,08
Střední výsledná energie	$E_p$ [kWh]	1077,46			-

Z výsledných energií 3 základních vozidel byla stanovena střední hodnota. Tataž hodnota byla poté zvolena pro výpočet hmotnosti článků a celkové hmotnosti čistě elektrického vozidla s cílem určit potřebnou hmotnost bateriových článků a celkovou hmotnost vozu (interpretováno rovnicemi 12 až 16 a shrnuto v tabulce č. 6).

$$E_{u4} = E_p (1 - \eta_{c4}), \quad (12)$$

$$E_{nu4} = E_p + E_{u4}, \quad (13)$$

$$m_{fu4} = \frac{E_{nu4}}{w_{b4}}, \quad (14)$$

$$m_{ku4} = m_{v4} - m_{s4}, \quad (15)$$

$$m_{EV1} = \frac{m_{fu4}}{x_4} + m_{ku4}. \quad (16)$$

Tab. 6 Výpočet celkové hmotnosti článků pro srovnání EV (č.4) varianta A

Výsledné hodnoty varianta A		
Průměrná celková nutná energie	$E_p$ [kWh]	1077,46
Připočtení z hlediska účinnosti	$E_{u4}$ [kWh]	107,21
Výsledná nutná energie ve voze	$E_{nu4}$ [kWh]	1184,67
Hmotnost článků vozu	$m_{fu4}$ [kg]	3996,29
Váha ostatních komponent vozu	$m_{ku4}$ [kg]	1180,00
Celková hmotnost vozu	$m_{EV1}$ [kg]	8445,97

### 3.2.7 SROVNÁVACÍ VARIANTA B

Srovnávací varianta B předpokládá fungování spalovacích motorů z hlediska spotřeby paliva pro konkrétní typ motoru vzhledem k základnímu předpokladu ze [116] a [117]. Pro benzínový motor vozidla č.1 tak byla volena spotřeba 1 l/1,25 km. Stejný typ pohonu je využíván i v hybridním vozidle č.3. Hodnota spotřeby je však ponížena vzhledem k jeho využití. V tomto konceptu funguje pouze jako generátor energie do systému RESS a nepodílí se tak přímo na samotném pohonu. Pravidlově je také omezena energie, která může procházet přes měnič. Motor tak není plně využíván, ale pracuje s cílem dosáhnout maximální účinnosti a nízké spotřeby pro co nejdější provoz. Velikost jeho spotřeby tak byla volena na 75 % hodnoty vozidla č.1 (1 l/1,67 km). Do výsledné spotřebované energie byla započítána i 15% schopnost rekuperace.

Vznětový motor vozidla č.2 je efektivnější při propočtu maximální vzdálenosti a dlouhodobé jízdy. Navíc pohání pouze zadní nápravu což je další faktor pro snížení paliva společně s jeho vysokým poměrem výkonu na celkovou hmotnost. Byla tak volena spotřeba cca 1 l/1,55 km. Pro porovnávané vozidlo č. 4 využívající čistě elektrický pohon ve formě jediného MGU byla volena hodnota spotřeby na základě hodnot od výrobce (viz popis vozidla.). Ta se má pohybovat v běžných podmínkách v rozmezí 20 až 45 kWh/100 km. Deklarovaný dojezd

v podmínkách kategorie T1 (například Rally Dakar) je však pouze kolem 200 km. Z maximální kapacity baterie s připočtením schopnosti rekuperace tak byla stanovena objektivní spotřeba. Vše je zpracováno pomocí rovnic 17 až 21 a prezentováno v tabulce č.7.

$$C_{e1-2} = C_{k1-2} \rho_{1-2} w_{k1-2}, \quad (17)$$

$$C_{e3} = C_{k3} \rho_3 w_{k3} (1 - \eta_{r3}), \quad (18)$$

$$C_{e4} = \frac{E_{c4} (1 + \eta_{r3})}{S_{v4}}, \quad (19)$$

$$S_{v1-3} = \frac{E_{c4}}{C_{e4}}, \quad (20)$$

$$S_c = \frac{1}{3} \sum_1^3 S_v. \quad (21)$$

Tab. 7 Výpočet průměrného dojezdu v etapě vozů dle spotřeb a spotřeba energie vozidla č.4

Srovnávané vozidlo		Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4
Typ pohonného média	-	benzín	motorová nafta	hybridní (benzín)	elektrická energie
Celková energie ve voze	$E_c$ [kWh]	5128,1	4112,6	3280,8	150,0
Rekuperace energie	$\eta_r$ [%]	-	-	15	15
Spotřeba paliva	$C_k$ [l/100 km]	80	65	60	-
Spotřeba energie	$C_e$ [kWh/100 km]	759,72	668,29	484,32	86,25
Dojezd vozů v etapě	$S_v$ [km]	675,0	615,4	677,4	200,0
Průměrný dojezd v etapě	$S_c$ [km]	655,93			-

V dalším kroku byla srovnávána vypočtená průměrná dojezdová vzdálenost prvních tří vozů ve vztahu k objektivní spotřebě vozu č.4. Výsledná nutná energie pro dosažení stejné vzdálenosti byla dále použita pro výpočet potřebných hmotností bateriového systému i článků (viz rovnice 22 až 29). Výsledky jsou poté interpretovány v tabulce č.8.



$$E_{nz4} = C_{e4} S_c , \quad (22)$$

$$m_{fz4} = \frac{E_{nz4}}{W_{b4}} , \quad (23)$$

$$p_4 = \frac{m_{fz4}}{m_{\check{c}4}} , \quad (24)$$

$$C_{ws4} = 0,5 p_4 C_{e4} , \quad (25)$$

$$E_{ns4} = C_{ws4} S_c , \quad (26)$$

$$m_{fs4} = \frac{E_{ns4}}{W_{b4}} , \quad (27)$$

$$m_{ks4} = m_{v4} - m_{s4} , \quad (28)$$

$$m_{EV2} = \frac{m_{fs4}}{x_4} + m_{ks4} . \quad (29)$$

Tab. 8 Výpočet celkové hmotnosti článků pro srovnání EV (č.4) varianta B

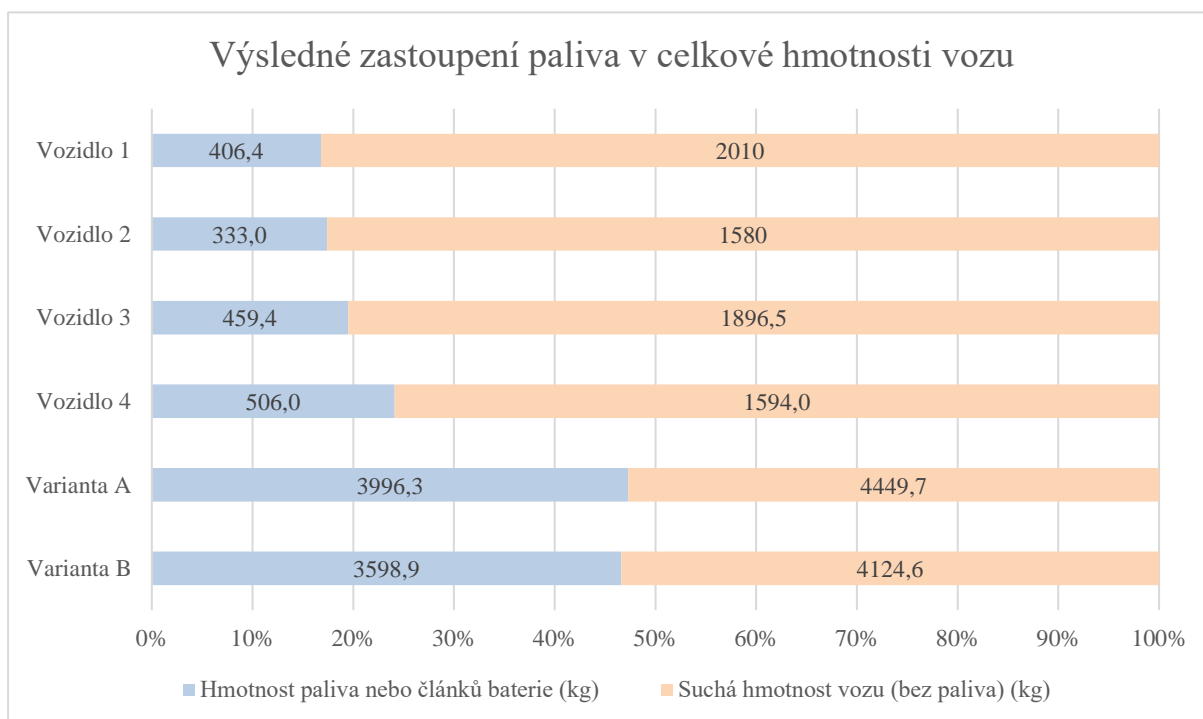
Výsledné hodnoty varianta B		
Průměrný dojezd v etapě	$S_c$ [km]	655,93
Výsledná nutná energie ve voze	$E_{nz4}$ [kWh]	565,74
Hmotnost potřebných článků	$m_{fz4}$ [kg]	1908,43
Hmotnostní poměr stavů	$p_4$ [-]	3,77
Spotřeba po zohlednění hmotnosti	$C_{ws4}$ [kWh/100 km]	162,65
Nutná energie přepočít	$E_{ns4}$ [kWh]	1066,87
<b>Hmotnost potřebných článků přepočít</b>	<b><math>m_{fs4}</math> [kg]</b>	<b>3598,90</b>
Váha ostatních komponent vozu	$m_{ks4}$ [kg]	1180,00
<b>Celková hmotnost vozu</b>	<b><math>m_{EV2}</math> [kg]</b>	<b>7723,46</b>

### 3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledná hmotnost článků v případě srovnání z hlediska spotřeby paliva a účinností motorů odpovídá více než 7násobku jejich základní hmotnosti v počátečním modelu ev (vozidlo č.4). Vzhledem k průměrům paliv v ostatních srovnávaných vozech je to až 10násobek.

Celková hmotnost vozu při zachování stávajících komponent a poměru vzhledem k bateriovému systému vzroste na více než 4násobek minimálního limitu kategorie T1U. Bude mít tak hodnotu 8445,97 kg v případě varianty A a 7723,46 kg v případě varianty B. Tyto hmotnosti by se tak řadily spíše do kategorie terénních nákladních kamionů kategorie T5, které však disponují mnohem vyšším výkonem nebo velikostí palivové nádrže.

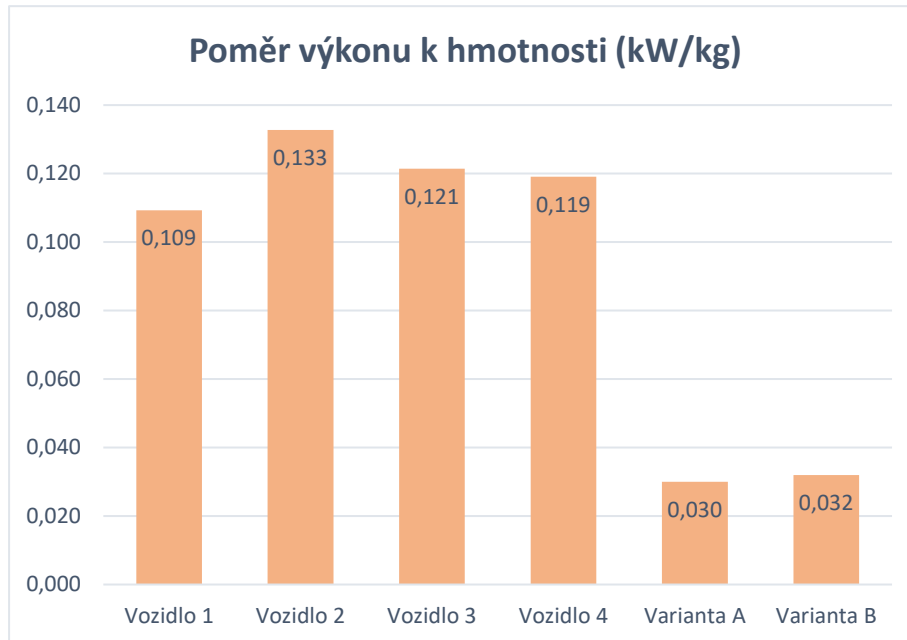
Váha by byla také výrazným ovlivněním chování vozu z hlediska výkonových schopností umocněné o vlastnosti terénu typického pro závody Cross-country Rally. Pro lepší popis byly výsledné hodnoty základních vozidel a vypočtených variant graficky znázorněny v rámci srovnání poměrů samotného paliva se zbývající suchou hmotností vozu (graf 1).



Graf. 1 Srovnání celkových hmotností a poměrů jejich složek

V celkovém součtu by pak vůz vyžadoval nové technologické úpravy pro navýšení výkonu, dodržení bezpečností a nosností jednotlivých prvků vozu. Mezi ně by se řadilo například přidání dalších pohonných MGU, úprava podvozkových částí, přidání prvků ochranného rámu, změna pneumatik a další. Všechny tyto změny by tak znamenaly dodatečnou váhu a další negativní ovlivnění schopností vozu ve vztahu k jízdě. Z hlediska všech těchto aspektů je tak možné říci, že vůz by nebyl schopen dosáhnout energetických a výkonových schopností, které přinášejí vozy s koncepty spalovacích motorů a hybridního spojení na takové úrovni, aby stále zůstal konkurenceschopný v jízdních podmínkách dané kategorie.

Jako další ukazatel schopností vozu bylo vytvořeno srovnání výkonů jednotlivých vozidel a výpočtových variant ve vztahu k celkovým hmotnostem (graf 2). To ukazuje v průměru až 4násobný pokles oproti původnímu poměru ev a dalším variantám se spalovacími motory.



Graf. 2 Srovnání vozů z hlediska poměru výkon/hmotnost

## ZÁVĚR

Jednotlivé kategorie elektrického motorsportu nabízejí množství koncepčních nastavení z hlediska pohonu vozu. Ten je ve většině z nich zařazen do vývojově volných aspektů, které jsou pravidlově omezeny hlavně po stránce maximálního výkonu dodávaného bateriovým systémem nebo elektromotorem.

Soutěžní týmy jsou nejčastěji zastoupeny automobilními společnostmi, které pracují na vlastním vývoji ev pro běžné uživatele. Do závodních prototypů jsou tak implementovány i technologie z těchto vozů nebo naopak vzniká možnost testování pohonů v náročných podmínkách a zpětná implementace pokroku do sériových vozů. Není tak ve většině případů možné získat podrobnější technické detaily, které by blíže přiblížili způsob fungování jednotlivých modelů a prototypů. Celkově je také náročné rozhodnout, zda není možnost vlastního vývoje v čistě elektrických sériích přílišným zvýhodněním pro týmy s vyššími finančními možnostmi na úkor schopností samotných jezdců.

Pro prototypy ve volných kategoriích motorsportu je umožněno vzájemné porovnávání vozů se spalovacími motory a elektromotorem. V případě závodních seriálů, u kterých je hlavním aspektem časové srovnání na kratší předem stanovený úsek vykazuje elektrický pohon výrazně lepší dosažené výsledky než spalovací koncepty. Jejich hlavními přednostmi jsou vysoký a rychle dosažený točivý moment vozu, a tak i vysoká průměrná rychlost na celém úseku. Pro vzdálenostně delší nebo vytrvalostní série jsou uplatňovány nejčastěji hybridní koncepty, které umožňují využití předností obou způsobů pohonu. Spalovací motor umožňuje dosažení vyšších vzdáleností díky vysoké energetické hustotě kapalných paliv oproti bateriovým článkům. Elektromotor poskytuje naproti tomu mnohem rychlejší dodání výkonu společně s nízkou spotřebou a rekuperačními schopnostmi. Hlavním úkolem při vývoji je stanovení správného poměru obou těchto technologií tak, aby dosáhl vysokého poměru výkonu k váze.

V následujících letech je v plánu FIA vytvoření nových oficiálních sérií elektrického motorsportu. Pro série se spalovacími motory budou postupně aplikována emisně přijatelnější kapalná paliva nebo hybridní koncepce.

Výsledky srovnání jednotlivých konceptů v praktické části ukazují, že možnosti čistě elektrického vozu nejsou pro závodní použití v kategorii T1 konkurenceschopné s ostatními koncepty.

Elektrický motor ve srovnání se spalovacími nabízí přijatelný výkon a nízkou hmotnost. Navíc návratnost z hlediska rekuperačních schopností umožňuje vozu celkově spotřebovat zdatelně nižší energetickou hodnotu vzhledem k ujeté vzdálenosti. Hlavním problémem je tak technologie bateriových článků. Energetická hustota obsažená v kilogramu běžných kapalných paliv je totiž až 40krát vyšší než u stejné hmotnosti běžných lithium-iontových článků. Velké množství společností se tak zabývá zdokonalením již užívaných článků z hlediska snížení ztrát vlivem použitých materiálů nebo odporovými vlastnostmi vodičů, měničů a ostatních komponent. Další možností je vývoj nových variant článků, které využívají jiný než dosavadní kapalný elektrolyt (například pevný elektrolyt).

Z hlediska srovnávaných vozů při využití maximálních možných energetických prostředků a stejné hmotnosti by bylo potřeba dosáhnout hustoty energie v člancích o hodnotě více než  $2,34 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ . To je téměř 8násobek použité baterie ve srovnávaném vozidle č.4. Aktuálně

vyvíjené články nabízí pro technologicky pokročilejší varianty lithium-iontových baterií teoretickou hustotu energie až kolem  $700 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$  a pro baterie s pevným elektrolytem až přes hranici  $2 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Otázkou tak zůstává, zda také dokážou disponovat potřebným množstvím nabíjecích a vybíjecích cyklů společně s dostatečným výkonem důležitým pro motorsport. Zvýšení všech těchto předpokladů umožní vozidlům snížení procentuálního zastoupení hmotnosti paliva ve voze. To vede ke zlepšení výkonových a jízdních vlastností v čele především s prodlouženým dojezdem a zrychlením.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Electric Vehicle (EV) Definition*. Online. U.S. Department of Energy. 2021. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/laws/12660>. [cit. 2024-03-14].
- [2] WANG, Shiyong a GE, Mengpin. *Everything You Need to Know About the Fastest-Growing Source of Global Emissions: Transport*. Online. World Resources Institute. 2019. Dostupné z: <https://www.wri.org/insights/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport>. [cit. 2024-03-14].
- [3] HARRISON, Gillian. *The Age of the Electric Car?* Online. World Resources Institute. 2017. Dostupné z: <https://www.renewableinstitute.org/age-of-the-electric-car/>. [cit. 2024-03-14].
- [4] A. WILSON, Kevin. *Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present*. Online. Caranddriver. 2023. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/features/g43480930/history-of-electric-cars/>. [cit. 2024-02-15].
- [5] GERTZ, Marisa a GRENIER, Melinda. *171 Years Before Tesla: The Evolution of Electric Vehicles*. Online. Bloomberg Hyperdrive. 2019. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/photo-essays/2019-01-05/171-years-before-tesla-the-evolution-of-electric-vehicles>. [cit. 2024-02-15].
- [6] YAP, Laurance. *History of Early Electric Cars*. [online]. GreenCars, GreenCars 101. 2023. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://www.greencars.com/greencars-101/history-of-early-electric-cars>.
- [7] YAP, Laurance. *History of Modern Electric Cars*. Online. GreenCars, GreenCars 101. 2023. Dostupné z: <https://www.greencars.com/greencars-101/history-of-modern-electric-cars>. [cit. 2024-02-15].
- [8] MATULKA, Rebecca. *The History of the Electric Car*. Online. U.S. Department of Energy. 2014. Dostupné z: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>. [cit. 2024-02-15].
- [9] BARTEK, Jakub. *PRVNÍ PRIUS BYL DRAHÝM EXPERIMENTEM. TOYOTĚ SE VŠAK VYPLATIL*. Online. Autobible.euro. 2019. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/clanky/retro-toyota-prius-prvni-generace/>. [cit. 2024-02-15].
- [10] LIXIN, Situ. *Electric Vehicle development: The past, present & future. 2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*. 2009, s. 1-3. ISBN 1424438454. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5228601>.
- [11] TESLA MOTORS. *Supercharger*. Online. Tesla. 2024. Dostupné z: [https://www.tesla.com/en\\_gb/supercharger](https://www.tesla.com/en_gb/supercharger). [cit. 2024-02-15].
- [12] STAFFORD, Eric. *2022 Lucid Air*. Online. Caranddriver. 2022. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/lucid-motors/air-2022>. [cit. 2024-02-15].

- [13] STAFFORD, Eric. *2024 Lotus Evija*. Online. Caranddriver. 2024. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/lotus/evija>. [cit. 2024-02-15].
- [14] KING, Charlie. *Top 10 Electric Supercars*. Online. Evmagazine. 2023. Dostupné z: <https://evmagazine.com/top10/top-10-electric-supercars>. [cit. 2024-02-15].
- [15] FINNERTY, Joe. *The fastest accelerating electric cars in 2024 to get the pulse racing*. Online. Gridserve. 2024. Dostupné z: <https://www.gridserve.com/2024/02/12/the-fastest-accelerating-electric-cars-in-2023-to-get-the-pulse-racing/>. [cit. 2024-02-15].
- [16] UN-NOOR, Fuad; PADMANABAN, Sanjeevikumar; MIHET-POPA, Lucian; MOLLAH, Mohammad a HOSSAIN, Eklas. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. Online. *Energies*. 2017, roč. 10, č. 8. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en10081217>. [cit. 2024-03-14].
- [17] SANGUESA, Julio A.; TORRES-SANZ, Vicente; GARRIDO, Piedad; MARTINEZ, Francisco J. a MARQUEZ-BARJA, Johann M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. [online]. *Smart Cities*. 2021, roč. 4, č. 1, s. 372-404. ISSN 2624-6511. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>.
- [18] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *How Do All-Electric Cars Work?* Online. U.S. Department of Energy. 2018. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>. [cit. 2024-03-14].
- [19] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *How Do Hybrid Electric Cars Work?* Online. U.S. Department of Energy. 2018. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>. [cit. 2024-03-14].
- [20] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work?* Online. U.S. Department of Energy. 2018. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>. [cit. 2024-03-14].
- [21] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?* Online. U.S. Department of Energy. 2018. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>. [cit. 2024-03-14].
- [22] FIAFORMULAE. *Welcome To The Story Of The ABB FIA Formula E World Championship*. Online. Fiaformulae. 2024. Dostupné z: <https://www.fiaformulae.com/en/championship/history>. [cit. 2024-03-20].
- [23] LEPORATI, Alessandra, KANTHI, Simran (ed.). *History of Formula E*. Online. Divebomb. 2023. Dostupné z: <https://www.dive-bomb.com/post/history-of-formula-e>. [cit. 2024-03-20].
- [24] FIAFORMULAE. *HISTORY: Looking Back Through Formula E's Key Moments*. Online. Fiaformulae. 2023. Dostupné z: <https://fiaformulae.com/en/news/486535/taking-a-look-back-through-formula-es-history>. [cit. 2024-03-20].

- [25] FIAFORMULAE. *Tokyo - CIRCUIT INFORMATION*. Online. Fiaformulae. 2024. Dostupné z: <https://www.fiaformulae.com/en/calendar/2023-24/r5-tokyo?tab=&area=circuit-info>. [cit. 2024-03-20].
- [26] ENELX. *What is Formula E and how does it work?* Online. Enelx. 2023. Dostupné z: <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/formula-e-how-does-it-work>. [cit. 2024-03-20].
- [27] COLLINS, Sam. *Formula E: Is this the future of motor racing?* Online. Racecar-engineering. 2013. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/technology/formula-e-is-this-the-future-of-motor-racing/>. [cit. 2024-03-20].
- [28] MRAZ, Stephen J. *The Evolution of the Formula E Racecar*. Online. Machinedesign. 2022. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/markets/automotive/article/21241764/the-evolution-of-the-formula-e-racecar>. [cit. 2024-03-20].
- [29] ABB FIA FORMULA E CHAMPIONSHIP. *Is This The Best-Looking Race Car Ever? - Gen1 Becomes Gen2 | ABB FIA Formula E Championship*. Online. Dailymotion. 2018. Dostupné z: <https://www.dailymotion.com/video/x6yc4jy>. [cit. 2024-03-20].
- [30] E-FORMULA.NEWS. *Technology in Formula E*. Online. E-formula.news. 2024. Dostupné z: <https://e-formula.news/wiki/technology>. [cit. 2024-03-20].
- [31] SCARBOROUGH, Craig. *In-depth: the Formula E powertrain explained*. Online. Carmagazine. 2022. Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/electric/formula-e-powertrain/>. [cit. 2024-04-20].
- [32] DRIVE. *McLaren Details P1 Powertrain*. Online. Drive. 2013. Dostupné z: <https://www.drive.com.au/news/mclaren-details-p1-powertrain/>. [cit. 2024-04-20].
- [33] MOTORSPORT.TECH. *Formula E Season 7 regulations – Motorsport Tech uncovers all*. Online. Motorsport.tech. 2020. Dostupné z: <https://motorsport.tech/formula-e/back-to-the-future-whats-in-store-regarding-formula-e-regulations-in-season-7>. [cit. 2024-03-20].
- [34] FIAFORMULAE. *The Evolution Of Formula E: Gen1, Gen2 And The Future*. Online. Fiaformulae. 2020. Dostupné z: <https://www.fiaformulae.com/en/news/10356/the-evolution-of-formula-e-gen1-gen2-and-the-future>. [cit. 2024-03-20].
- [35] FIAFORMULAE. *Formula E's Cutting Edge Electric Race Car, GEN3, Explained*. Online. Fiaformulae. 2024. Dostupné z: <https://fiaformulae.com/en/news/487147/formula-es-cutting-edge-electric-race-car-gen3-explained>. [cit. 2024-03-20].
- [36] FIAFORMULAE. *All you need to know about our brand new GEN3 ⚡ | FE Explained*. Online. In: YouTube. 2023. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=Z2zYIFINF1Q&ab\\_channel=FormulaE](https://www.youtube.com/watch?v=Z2zYIFINF1Q&ab_channel=FormulaE). [cit. 2024-03-20].

- [37] BLUHM, Tobias. *Changing aero kits, front motor development & 600 kW: FIA starts tender process for Formula E's Gen4 car*. Online. E-formula.news. 2023. Dostupné z: <https://e-formula.news/news/formula-e-news/formula-e-news-detail/changing-aero-kits-front-engine-development-600-kw-power-fia-starts-tender-process-for-formula-e-gen4-car-49071>. [cit. 2024-03-20].
- [38] PAPE, Timo. *600 kW power! Technical development plans for Formula E's Gen4 car revealed*. Online. E-formula.news. 2023. Dostupné z: <https://e-formula.news/news/formula-e-news/formula-e-news-detail/600-kw-power-technical-development-plans-for-formula-e-gen4-car-revealed-91451>. [cit. 2024-03-20].
- [39] FIA. *2023-2024 FIA FORMULA E WORLD CHAMPIONSHIP SPORTING REGULATIONS*. Online. FIA FORMULA E WORLD CHAMPIONSHIP - REGULATIONS. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/2023-2024\\_fia\\_formula\\_e\\_world\\_championship\\_-\\_sporting\\_regulations\\_06122023\\_-\\_marked-up.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2023-2024_fia_formula_e_world_championship_-_sporting_regulations_06122023_-_marked-up.pdf). [cit. 2024-03-20].
- [40] FIA. *2023-24 S10 FIA Formula E World Championship Technical Regulations*. Online. FIA FORMULA E WORLD CHAMPIONSHIP - REGULATIONS. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/2023-2024\\_season\\_10\\_formula\\_e\\_techregs\\_wmsc\\_19.10.2023\\_eng\\_fr\\_marked\\_up.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2023-2024_season_10_formula_e_techregs_wmsc_19.10.2023_eng_fr_marked_up.pdf). [cit. 2024-03-20].
- [41] FIAFORMULAE. *RULES AND REGULATIONS*. Online. Fiaformulae. 2024. Dostupné z: <https://www.fiaformulae.com/en/championship/rules-and-regulations>. [cit. 2024-03-20].
- [42] E-FORMULA.NEWS. *Extreme E - Electric Offroad Racing*. Online. E-formula.news. 2024. Dostupné z: <https://e-formula.news/extreme-e/information>. [cit. 2024-03-23].
- [43] PRYSON, Mike. *FIA Extreme E Series To Make U.S. Debut In 2024*. Online. Autoweek. 2023. Dostupné z: <https://www.autoweek.com/racing/more-racing/a46199630/fia-extreme-e-series-us-debut-i2024/>. [cit. 2024-03-23].
- [44] YAP, Laurance. *Behind the Scenes at Extreme E*. Online. Greencars. 2022. Dostupné z: <https://www.greencars.com/news/behind-the-scenes-at-extreme-e>. [cit. 2024-03-23].
- [45] E-FORMULA.NEWS. *Technology in Extreme E*. Online. E-formula.news. 2024. Dostupné z: <https://e-formula.news/extreme-e/technology>. [cit. 2024-03-23].
- [46] NIOBIUM.TECH. *Odyssey 21: Extreme safety. Exceptional protection*. Online. Niobium.tech. 2022. Dostupné z: <https://niobium.tech/en/pages/content-pages/odyssey-21-extreme-safety>. [cit. 2024-03-23].
- [47] FIAFORMULAE. *Everything You Need to Know About the ODYSSEY 21 | Extreme E Explained*. Online. In: YouTube. 2022. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=yhba6BGNs1k&ab\\_channel=ExtremeE](https://www.youtube.com/watch?v=yhba6BGNs1k&ab_channel=ExtremeE). [cit. 2024-03-23].

- [48] B.COMP. *Extreme E embraces high-performance natural fibre composites*. Online. B.comp. 2023. Dostupné z: <https://www.bcomp.ch/news/extreme-e-embraces-high-performance-natural-fibre-composites/>. [cit. 2024-03-23].
- [49] EXTREME-E. *ODYSSEY 21*. Online. Extreme-e. 2023. Dostupné z: <https://www.extreme-e.com/en/the-car>. [cit. 2024-03-23].
- [50] FIAFORMULAE. *ODYSSEY 21 eSUV Tour | Extreme E*. Online. In: YouTube. 2021. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=Xz-GIeLJStw&ab\\_channel=ExtremeE](https://www.youtube.com/watch?v=Xz-GIeLJStw&ab_channel=ExtremeE). [cit. 2024-03-23].
- [51] EXTREME-E. *RACE FORMAT*. Online. Extreme-e. 2024. Dostupné z: <https://www.extreme-e.com/en/race-format#>. [cit. 2024-03-23].
- [52] AUTOMOBILE CLUB DE MONACO. *EXTREME E SPORTING REGULATIONS*. Online. Comtech. 2021. Dostupné z: [https://www.comtech.app/files/Sporting-Regulations-FINAL\\_compressed.pdf](https://www.comtech.app/files/Sporting-Regulations-FINAL_compressed.pdf). [cit. 2024-03-20].
- [53] AUTOMOBILE CLUB DE MONACO. *Extreme E Technical Regulations*. Online. Comtech. 2021. Dostupné z: <https://www.comtech.app/files/01.02-Technical-regulations.pdf>. [cit. 2024-03-20].
- [54] E-FORMULA.NEWS. *FIA World Rallycross Championship (WRX)*. Online. E-formula.news. 2024. Dostupné z: <https://e-formula.news/e-serien/world-rallycross-wrx>. [cit. 2024-04-19].
- [55] ELECTRIC & HYBRID VEHICLE TECHNOLOGY INTERNATIONAL. *The superpowers of silicon carbide: The Factor*. Online. 2022, roč. 2022, č. 1. 2022. ISSN 1467-5560. Dostupné z: <https://ehv.mydigitalpublication.co.uk/articles/the-x-factor?m=63184&i=741610&p=2&ver=html5>. [cit. 2024-04-20].
- [56] FIA. *TECHNICAL DETAILS OF FIA WORLD RX1E POWERTRAIN REVEALED*. Online. Fia. 2020. Dostupné z: <https://www.fia.com/news/technical-details-fia-world-rx1e-powertrain-revealed>. [cit. 2024-04-19].
- [57] KREISELELECTRIC. *High-performance motorsport battery systems*. Online. Kreiselectric. 2023. Dostupné z: <https://www.kreiselectric.com/applications/motorsport-electrification/>. [cit. 2024-04-19].
- [58] HANSEN-MOTORSPORT. *208 RX1E: TECH SPECS*. Online. Hansen-motorsport. 2023. Dostupné z: <https://hansen-motorsport.se/team/car/>. [cit. 2024-04-19].
- [59] QEV TECHNOLOGIES S.L. *2022-RX2e-Championship-information*. Online. Fia-rx2e. 2022. Dostupné z: <https://fia-rx2e.com/wp-content/uploads/2022/05/2022-RX2e-Championship-information.pdf>. [cit. 2024-04-19].
- [60] DIRTFISH. *RX2E CAR REVEALED AHEAD OF 2021 DEBUT*. Online. Dirtfish. 2020. Dostupné z: <https://dirtfish.com/rallycross/world-rx/rx2e-car-revealed-ahead-of-2021-debut/>. [cit. 2024-04-19].



- [61] *Introducing the powerhouse behind ZEROID X1 - our battery pack delivers ultimate performance !* [@@officialrx2e]. Online. 2023. Dostupné z: Instagram, [https://www.instagram.com/p/CrxoblSM48f/?next=%2Fp%2FCBc4DbmA3lB%2F&hl=af&img\\_index=1](https://www.instagram.com/p/CrxoblSM48f/?next=%2Fp%2FCBc4DbmA3lB%2F&hl=af&img_index=1). [cit. 2024-04-20].
- [62] *The motor in the new QEV Technologies-developed FIA #RX2e car is an impressive piece of kit. Here are its vital statistics* [@@FIA RX2e Championship]. Online. 2020. Dostupné z: Facebook, <https://www.facebook.com/photo?fbid=167055098406328&set=a.133888721722966>. [cit. 2024-04-19].
- [63] *Ready for a car that gives you ultimate control and precision on the road?* [@@officialrx2e]. Online. 2023. Dostupné z: Instagram, <https://www.instagram.com/p/Cq73EuOMZMz/?next=%2Fp%2FCBc4DbmA3lB%2F&hl=af>. [cit. 2024-04-19].
- [64] FIA. *2024 FIA European Rallycross RX2e Championship Sporting Regulations*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/18.06\\_2024\\_fia\\_european\\_rallycross\\_rx2e\\_championship\\_sporting\\_regulations.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/18.06_2024_fia_european_rallycross_rx2e_championship_sporting_regulations.pdf). [cit. 2024-04-19].
- [65] FIA. *2024 FIA RX2e Championship Technical Regulations - WMSC 28.02.2024*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/rx2e\\_tech regs\\_appendix\\_6\\_2024\\_wmsc\\_2024.02.28.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/rx2e_tech regs_appendix_6_2024_wmsc_2024.02.28.pdf). [cit. 2024-04-19].
- [66] GITITSTORE. *Electric Vehicle Racing*. Online. World-gititstore. 2022. Dostupné z: <https://www.gititstore.com/electric-car-racing>. [cit. 2024-04-20].
- [67] VOLKSWAGEN. *Challenge AcceptID*. Online. Volkswagen. 2020. Dostupné z: <https://www.volkswagen.cz/ev/rodina-vozu-id/idr>. [cit. 2024-04-20].
- [68] PPIHC. *HISTORY OF THE PIKES PEAK INTERNATIONAL HILL CLIMB*. Online. THE PIKES PEAK INTERNATIONAL HILL CLIMB. 2023. Dostupné z: <https://ppihc.org/history/>. [cit. 2024-04-20].
- [69] MCNEIL, David. *THIRTY-EIGHT YEARS OF ELECTRIC CARS IN THE PIKES PEAK HILL CLIMB*. Online. THE PIKES PEAK INTERNATIONAL HILL CLIMB. 2018. Dostupné z: <https://ppihc.org/wp-content/uploads/History-of-EVs-on-Pikes-Peak-through-2018.pdf>. [cit. 2024-04-20].
- [70] MITSUBISHI-MOTORS. *2012 Pikes Peak International Hill Climb*. Online. Mitsubishi-motors. 2022. Dostupné z: [https://www.mitsubishi-motors.com/en/brand/motorsports/ev\\_phev/ppihc/2012/](https://www.mitsubishi-motors.com/en/brand/motorsports/ev_phev/ppihc/2012/). [cit. 2024-04-20].
- [71] VOLKSWAGEN. *ID.R: rekord na Pikes Peak*. Online. Volkswagen. 2019. Dostupné z: <https://www.volkswagen.cz/znacka/magazin/zivotni-styl/idr-rekord-na-pikes-peak>. [cit. 2024-04-20].

- [72] TURPEN, Aaron. *Why electric vehicles will continue to dominate Pikes Peak after record-shattering run*. Online. Teslarati. 2018. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/vw-id-r-electric-vehicle-pikes-peak-record/>. [cit. 2024-04-20].
- [73] SZYMKOWSKI, Sean. *Get a closer look at the Volkswagen ID R's battery technology*. Online. Motorauthority. 2019. Dostupné z: [https://www.motorauthority.com/news/1122908\\_get-a-closer-look-at-the-volkswagen-id-rs-battery-technology](https://www.motorauthority.com/news/1122908_get-a-closer-look-at-the-volkswagen-id-rs-battery-technology). [cit. 2024-04-20].
- [74] HARRISON, Tom. *The Volkswagen ID.R's ten most amazing numbers*. Online. Topgear. 2020. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/electric/volkswagen-idrs-ten-most-amazing-numbers>. [cit. 2024-04-20].
- [75] SZYMKOWSKI, Sean. *VW details the engineering behind charging ID R Pikes Peak racer*. Online. Motorauthority. 2018. Dostupné z: [https://www.motorauthority.com/news/1117245\\_vw-details-the-engineering-behind-charging-id-r-pikes-peak-racer](https://www.motorauthority.com/news/1117245_vw-details-the-engineering-behind-charging-id-r-pikes-peak-racer). [cit. 2024-04-20].
- [76] THEENGINEER. *Integral Powertrain wins Dewar Trophy for Pikes Peak electric motors*. Online. Theengineer. 2018. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/integral-powertrain-wins-dewar-trophy-for-pikes-peak-electric-motors>. [cit. 2024-04-20].
- [77] EHELIX. *SPC, SPM242 Platforms*. Online. Ehelix. 2022. Dostupné z: <https://www.ehelix.com/products/spm242-electric-motor/>. [cit. 2024-04-20].
- [78] COLLINS, Sam. *Porsche 919 (9R9 MY15-MY17)*. Online. Racecar-engineering. 2017. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/cars/porsche-919-9r9-my15/>. [cit. 2024-04-21].
- [79] DELLIS, Nicolaos. *Porsche 919 Hybrid Evo (2018)*. Online. Stuttcars. 2018. Dostupné z: <https://www.stuttcars.com/porsche-919-hybrid-evo/>. [cit. 2024-04-21].
- [80] WEC-MAGAZIN. *WEC Beginner's Guide: About the FIA WEC*. Online. Wec-magazin. 2015. Dostupné z: <https://wec-magazin.com/features/about-the-fia-wec/>. [cit. 2024-04-21].
- [81] SPORTSCARRACINGNEWS. *PORSCHE 919 HYBRID, POWER PLANT FOR THE LE MANS MARATHON*. Online. Sportscarracingnews. 2014. Dostupné z: <https://sportscarracingnews.com/2014/05/23/porsche-919-hybrid-power-plant-for-the-le-mans-marathon/>. [cit. 2024-04-21].
- [82] PORSCHE. *Technické specifikace 919 Hybrid*. Online. Porsche. 2017. Dostupné z: <https://porsche.cz/modely/racingcars/919-hybrid/technicka-specifikace>. [cit. 2024-04-21].
- [83] PORSCHE. *How the technology of the 919 Hybrid works*. Online. Newsroom.porsche. 2016. Dostupné z: <https://newsroom.porsche.com/en/motorsports/porsche-motorsport-fiawec-919-hybrid-technology-lmp1-race-car-12724.html>. [cit. 2024-04-21].

- [84] FIA. 2024 - *APPENDIX J – ARTICLE 281, Classification and Definitions of Cross-Country Vehicles*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/281\\_2024\\_0.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/281_2024_0.pdf). [cit. 2024-03-20].
- [85] FIA. *NEW TERMINOLOGY OF FIA CROSS-COUNTRY RALLYING DISCIPLINES TO BE USED FROM 2024*. Online. Fia. 2023. Dostupné z: <https://www.fia.com/news/new-terminology-fia-cross-country-rallying-disciplines-be-used-2024>. [cit. 2024-03-20].
- [86] LILLO, Sergio. *THE TECHNICAL AND REGULATORY BATTLE OF DAKAR 2022*. Online. Motorsport. 2022. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/dakar/news/the-technical-and-regulatory-battle-of-the-dakar-2022/7057880/>. [cit. 2024-04-06].
- [87] FIA. 2024 - *APPENDIX J – ARTICLE 252 - General Prescriptions for Cars of Group N, A (and Extensions) and R-GT - WMSC 28.02.2024*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/252\\_2024\\_wmsc\\_2024.02.28\\_pj.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/252_2024_wmsc_2024.02.28_pj.pdf). [cit. 2024-04-06].
- [88] FIA. 2024 - *APPENDIX J – ARTICLE 282 – General Prescriptions for Cross Country Vehicles - WMSC 28.02.2024*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/252\\_2024\\_wmsc\\_2024.02.28\\_pj.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/252_2024_wmsc_2024.02.28_pj.pdf). [cit. 2024-04-06].
- [89] FIA. 2024 - *APPENDIX J – ARTICLE 285 – Specific Regulations for Modified Cross-Country Cars (Group ULTIMATE) - Updated 19.03.2024*. Online. Fia. 2024. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/285\\_2024\\_updated\\_2024.03.19.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/285_2024_updated_2024.03.19.pdf). [cit. 2024-04-06].
- [90] FIA. *T1 T-C petrol engines - Process to add an engine to the engine list & Monitoring process*. Online. Fia. 2023. Dostupné z: [https://www.fia.com/sites/default/files/t1\\_t-c\\_engines\\_-\\_process\\_to\\_add\\_an\\_engine\\_to\\_the\\_engine\\_list\\_monitoring\\_process\\_-\\_20240206.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/t1_t-c_engines_-_process_to_add_an_engine_to_the_engine_list_monitoring_process_-_20240206.pdf). [cit. 2024-04-06].
- [91] TOYOTAGAZOORACING. *NEW HILUX STRENGTHENS TOYOTA GAZOO RACING FOR 2024 DAKAR AND W2RC SEASON*. Online. Toyotagazooracing. 2023. Dostupné z: <https://toyotagazooracing.com/dakar/release/2023/1213-01/>. [cit. 2024-04-05].
- [92] TOYOTA. *New Hilux strengthens Toyota Gazoo Racing for 2024 Dakar and World Rally-Raid Championship*. Online. Media.toyota. 2023. Dostupné z: <https://media.toyota.co.uk/new-hilux-strengthens-toyota-gazoo-racing-for-2024-dakar-and-world-rally-raid-championship/>. [cit. 2024-04-05].
- [93] CLIFFORD, Joe. *W2RC 2023: Toyota's Dakar Rally line-up*. Online. Toyota. 2022. Dostupné z: <https://mag.toyota.co.uk/w2rc-2023/>. [cit. 2024-04-05].
- [94] PEUGEOT. *PEUGEOT 3008 DKR – Technical data*. Online. Autogrifon. 2017. Dostupné z: [https://www.autogrifon.hr/wp-content/uploads/2016/09/PEUGEOT-3008-DKR\\_Technical-Data\\_UK.pdf](https://www.autogrifon.hr/wp-content/uploads/2016/09/PEUGEOT-3008-DKR_Technical-Data_UK.pdf). [cit. 2024-04-04].
- [95] ULTIMATECARPAGE. *Peugeot 3008 DKR Maxi*. Online. Ultimatecarpage. 2017. Dostupné z: <https://www.ultimatecarpage.com/spec/6879/Peugeot-3008-DKR-Maxi.html>. [cit. 2024-04-04].

- [96] NOGALES, Mario. *Peugeot 3008 DKR, Carlos Sainz's new weapon for the Dakar*. Online. Actualidadmotor. 2017. Dostupné z: <https://www.actualidadmotor.com/en/peugeot-3008-dkr-carlos-sainz%27s-new-weapon-for-the-dakar/>. [cit. 2024-04-04].
- [97] LOPEZ, Jonathan. *2018 Peugeot 3008 DKR Maxi, The French automaker's shot at a three-peat exit from the Dakar*. Online. Topspeed. 2017. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/peugeot/2018-peugeot-3008-dkr-maxi/>. [cit. 2024-04-04].
- [98] AUDI. *RS-Q-e-tron*. Online. AUDI. Audi.com. 2024. Dostupné z: <https://www.audi.com/en/sport/motorsport/audi-racing-models/rs-q-e-tron.html>. [cit. 2024-03-04].
- [99] TOPGEAR. *How does Audi's RS Q e-tron Dakar car work?* Online. Topgear. 2024. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/audi-dakar-2023/how-does-audis-rs-q-e-tron-dakar-car-work>. [cit. 2024-04-04].
- [100] AUDI. *Formula E: The Audi MGU05 in the e-tron FE07*. Online. Audi. 2020. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/videos/video/formula-e-the-audi-mgu05-in-the-e-tron-fe07-5332>. [cit. 2024-04-04].
- [101] AUDI. *Technical data: Audi RS Q e-tron (Dakar 2024)*. Online. Audi. 2023. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/audi-at-the-dakar-rally-2024-15749/technical-data-audi-rs-q-e-tron-dakar-2024-15750>. [cit. 2024-04-04].
- [102] HANKE, Petr. *Audi RS Q e-tron – S hybridem do pouště*. Online. Automobilrevue. 2022. Dostupné z: [https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/motorsport/audi-rs-q-e-tron-s-hybridem-do-pouste\\_49036.html](https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/motorsport/audi-rs-q-e-tron-s-hybridem-do-pouste_49036.html). [cit. 2024-04-04].
- [103] ELECTRICHASGONEAUDI. *Audi e-tron battery*. Online. ELECTRICHASGONEAUDI. Electrichasgoneaudi. 2024. Dostupné z: <https://electrichasgoneaudi.net/models/e-tron/drivetrain/battery/>. [cit. 2024-04-04].
- [104] AUDI. *Rallye Dakar: The high-voltage battery in the Audi RS Q e-tron*. Online. .audi-mediacycenter. 2021. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/rallye-dakarthe-high-voltage-battery-in-the-audi-rs-q-e-tron-14453>. [cit. 2024-04-04].
- [105] LOMBARDO, Tom. *Electric Car Competes in the Dakar Rally*. Online. Engineering. 2015. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/electric-car-competes-in-the-dakar-rally>. [cit. 2024-04-04].
- [106] RALLYRAIDNETWORK. *ACCIONA DAKAR*. Online. Rallyraidnetwork. 2020. Dostupné z: <https://www.rallyraidnetwork.com/rally/index.php/directory/racing-teams/cars/acciona-dakar.html>. [cit. 2024-04-04].
- [107] ACCIONA. *ACCIONA 100 ECOPOWERED ELECTRIC VEHICLE*. Online. Acciona. 2020. Dostupné z: [https://www.acciona.com/our-purpose/initiatives/acciona-100-ecopowered-dakar-rally/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/our-purpose/initiatives/acciona-100-ecopowered-dakar-rally/?_adin=02021864894). [cit. 2024-04-04].

- [108] ACCIONA. *MIDDLE EAST THE ART OF BUSINESS*. Online. Acciona. 2017. Dostupné z: <https://mediacd.acciona.com/media/2056883/acciona-report-65.pdf>. [cit. 2024-04-04].
- [109] WORLD-NUCLEAR ASSOCIATION. *Heat Values of Various Fuels*. Online. World-nuclear. 2023. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>. [cit. 2024-04-19].
- [110] HOLLAND, Alex. *MIDDLE EAST THE ART OF BUSINESS*. Online. Eetimes. 2024. Dostupné z: <https://www.eetimes.eu/li-ion-battery-technology-still-has-further-to-go/>. [cit. 2024-04-19].
- [111] RENAULTGROUP. *The energy efficiency of an electric car motor*. Online. Renaultgroup. 2021. Dostupné z: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-energy-efficiency-of-an-electric-car-motor/>. [cit. 2024-04-19].
- [112] ALBATAYNEH, Aiman; ASSAF, Mohammad N.; ALTERMAN, Dariusz a JARADAT, Mustafa. Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. Online. *Environmental and Climate Technologies*. 2020, roč. 24, č. 1, s. 669-680. ISSN 2255-8837. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>. [cit. 2024-04-19].
- [113] FUELECONOMY. *Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles*. Online. Fueleconomy. 2023. Dostupné z: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>. [cit. 2024-04-19].
- [114] FUELECONOMY. *Where the Energy Goes: Electric Cars*. Online. Fueleconomy. 2023. Dostupné z: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml>. [cit. 2024-04-19].
- [115] X-ENGINEER. *Drivetrain losses (efficiency)*. Online. X-engineer. 2022. Dostupné z: <https://x-engineer.org/drivetrain-losses-efficiency/>. [cit. 2024-04-19].
- [116] IDNES. *VIDEO: Bestie z Jihlavy míří na Dakar, žere 90 litrů benzínu na 100 km*. Online. Idnes. 2017. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/martin-prokop-ford-raptor-rally-dakar.A171222\\_210806\\_automoto\\_fdv](https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/martin-prokop-ford-raptor-rally-dakar.A171222_210806_automoto_fdv). [cit. 2024-04-19].
- [117] IEA. *Drivetrain losses (efficiency)*. Online. Iea. 2021. Dostupné z: <https://www.iea.org/articles/fuel-economy-in-the-united-kingdom>. [cit. 2024-04-19].

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

4×2		vozy s pohonem dvou kol
4×4		vozy s pohonem všech čtyř kol
ABB		ASEA Brown Boveri
BEV		battery electric vehicle
BMS		battery management system
CO <sub>2</sub>		oxid uhličitý
DRS		drag reduction system
EV		Electric Vehicle
F1		Formule 1
FCEV		fuel cell electric vehicle
FE		Formule E
FIA		Fédération Internationale de l'Automobile
HE		Hewland Engineering
HEV		hybrid electric vehicle
LMP1		kategorie vozů s uzavřeným kokpitem pro závody v soutěži WEC
MAT		McLaren Applied Technologies
MGU		motor generator unit
NASA		National Aeronautics and Space Administration
PHEV		plug-in electric vehicle
PPIHC		Pikes Peak International Hill Climb
RESS		rechargeable energy storage system
SUV		sport utility vehicle
T1		kategorie vozů soutěže v Cross-Country Rallying
T1.X		vozy podkategorie T1.2 a T1.3
T1+		nejvýkonnější podkategorie Cross-Country Rallying
VCU		vehicle control unit
WAE		Williams Advanced engineering
WEC		FIA World Endurance Championship
WRX		FIA World Rallycross Championship
C	[kWh]	kapacita baterie
C <sub>e</sub>	[kWh/100 km]	spotřeba energie sledovaných vozů
C <sub>k</sub>	[l/100 km]	spotřeba paliva sledovaných vozů



$C_{ws4}$	[kWh/100 km]	spotřeba vozu po zohlednění poměru stavů hmotností varianta B
$E_c$	[kWh]	celková energie ve voze
$E_{ns4}$	[kWh]	výsledná nutná energie po zohlednění poměru stavů ve voze 4 var. B
$E_{nu4}$	[kWh]	výsledná nutná energie ve voze 4 varianta A
$E_{nz4}$	[kWh]	výsledná nutná energie ve voze 4 varianta B
$E_p$	[kWh]	průměrná vypočtená energie srovnávaných vozů
$E_{u4}$	[kWh]	nutná energie připočtená vlivem účinnosti ve voze 4 varianta A
$E_v$	[kWh]	výsledná vypočtená energie ve voze
$k_p$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	tuhost odpružení přední nápravy
$k_z$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	tuhost odpružení zadní nápravy
$m_c$	[kg]	celková hmotnost vozu
$m_{\check{c}}$	[kg]	hmotnost článků baterie
$m_{EV1}$	[kg]	celková hmotnost vozu varianta A
$m_{EV2}$	[kg]	celková hmotnost vozu varianta B
$m_{fs4}$	[kg]	výsledná nutná hmotnost článků vozu 4 varianta B
$m_{fs4}$	[kg]	výsledná nutná hmotnost článků vozu 4 varianta B
$m_{fu4}$	[kg]	výsledná nutná hmotnost článků vozu 4 varianta A
$m_k$	[kg]	hmotnost paliva
$m_{ks4}$	[kg]	váha ostatních komponent vozu 4 varianta B
$m_{ku4}$	[kg]	váha ostatních komponent vozu 4
$m_s$	[kg]	hmotnost systému baterie
$m_v$	[kg]	suchá hmotnost vozu
$P$	[kWh]	výkon motoru
$p_4$	[-]	hmotnostní poměr stavů vozu 4 varianta B
$P_{mm}$	[%]	procentuální poměr váhy paliva/hmotnost vozu
$p_n$	[-]	počet poháněných náprav
$P_{vm}$	[kW·kg <sup>-1</sup> ]	poměr výkon/celková hmotnost vozu
$S_c$	[km]	průměrný výsledný vypočítaný dojezd srovnávaných vozů
$S_v$	[km]	výsledný vypočítaný dojezd srovnávaných vozů
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem nádrže
$w_b$	[Wh·kg <sup>-1</sup> ]	hustota energie článků
$w_k$	[kWh·kg <sup>-1</sup> ]	hustota energie v kapalném palivu 2
$w_m$	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]	hustota energie v kapalném palivu 1

---

$x$	[%]	hmotnostní poměr články/baterie
$\eta_c$	[%]	celková účinnost hlavního pohonu vozu
$\eta_h$	[%]	hmotnostní ztráty vozu
$\eta_p$	[%]	celková účinnost přídavného motoru vozu
$\eta_r$	[%]	návratnost využití energie rekuperací
$\eta_v$	[%]	vnitřní a vnější ztráty vozu
$\eta_z$	[%]	základní účinnost pohonu daného vozu
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota kapalného paliva