



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

NÁVRH KONCEPCE ELEKTRICKÉHO ZÁVODNÍHO KAMIONU

ELECTRIC RACING TRUCK CONCEPT DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Prchal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **David Prchal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. David Svída, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Návrh koncepce elektrického závodního kamionu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je snaha prosadit elektromobilitu do širokého spektra motoristických závodních disciplín, a to i takových, kde to na první pohled nedává smysl. Příkladem takové snahy je dálková vytrvalostní soutěž Rallye Dakar. Práce je zaměřena na návrh koncepce závodního elektrického/hybridního kamionu.

Cíle bakalářské práce:

Provedení analýzy energetických požadavků na jednu závodní etapu u současných závodních kamionů pro soutěž Rallye Dakar a návrh ekvivalentní varianty v elektrickém nebo hybridním provedení.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, H. Advanced Engine Technology. 1st edition. Oxford (Great Britain): Arnold, 1995, reprint 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

MERKER, G. P., SCHWARZ, CH., TEICHMAN, R. Combustion Engines Development – Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation. Heidelberg: Springer, 2012. 642 s. ISBN 978-3-642-02951-6.

SHI, Y., GE, H.-W., REITZ, R. D. Computational Optimization of Internal Combustion Engines. London: Springer, 2011. 309 s. ISBN 978-0-85729-618-4.

MTZ Motorentechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer Wieweg | Springer Fachmedien Weisbaden GmbH, 1939- . ISSN 0024-8525.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne 6. 9. 2021

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem koncepce elektrického nebo hybridního kamionu pro dálkovou vytrvalostní soutěž Rallye Dakar. Rešeršní část se zabývá samotnou soutěží, rozborem parametrů a konstrukce současných závodních kamionů se spalovacím motorem a současnými nízkoemisními koncepty pro danou soutěž. Praktická část se zabývá nejprve analýzou energetických nároků jedné etapy závodu a následně kritickým zhodnocením možností hybridního nebo elektrického řešení. Z nich je zvolena koncepce typu EREV a proveden návrh parametrů komponent. Důraz je kladen zejména na to, aby koncepce měla co nejméně kompromisů a byla z hlediska teoretických jízdních výkonů srovnatelná s klasickými závodními kamiony, které používají spalovací motor.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rallye Dakar, elektrický kamion, hybridní kamion, závodní kamion, energetické nároky, BEV, FCEV, EREV

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on projecting electric or hybrid conception of Rally Dakar racing truck. The researching part is focused on the Dakar Rally, analysis of parameters and construction of current racing trucks with internal combustion engines and current low emission concepts used in this competition. The practical part is firstly focused on analysis of energy requirements for one stage of competition and critical evaluation of possibilities of hybrid or electrical solutions. Subsequently, the EREV conception is chosen and the parameters for components are suggested. Emphasis is placed on ensuring that the concept has as few compromises as possible and is comparable in terms of theoretical driving performance to conventional racing trucks that use an internal combustion engine.

KEYWORDS

Dakar Rally, electric truck, hybrid truck, racing truck, energetic requirements, BEV, FCEV, EREV

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRCHAL, David. Návrh koncepce elektrického závodního kamionu. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138004>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Svída.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 12. května 2022

.....

David Prchal

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za poskytnuté podklady, cenné připomínky a jeho ochotné a trpělivé vedení práce.

Rovněž děkuji své rodině a přítelkyni za vytrvalou podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Rallye Dakar	11
2 Kategorie T5.2.....	13
2.1 Motor a převodovka.....	13
2.2 Konstrukce	14
2.2.1 Kabina.....	14
2.2.2 Nákladový prostor	15
2.2.3 Rám.....	15
2.2.4 Nápravy a řízení.....	16
2.2.5 Pohon.....	17
2.2.6 Palivové nádrže.....	17
2.2.7 Brzdy	18
2.2.8 Zástavbový prostor	18
3 Nízkoemisní a hybridní koncepty.....	19
3.1 Automobily	19
3.2 Kamiony.....	24
3.2.1 Renault C460 Hybrid Edition	24
3.2.2 Gaussin H2 Racing truck	25
3.2.3 HE3DA	27
4 Vlastní energetické řešení	28
4.1 Zpracování dat	28
4.2 Možnosti řešení.....	29
4.2.1 BEV	29
4.2.2 FCEV	30
4.2.3 EREV	31
4.3 Návrh a kontrola parametrů komponent	32
4.3.1 Výkon prodlužovače dojezdu	32
4.3.2 Kapacita akumulátoru.....	33
4.3.3 Objem palivových nádrží.....	35
5 Vlastní koncepce	37
5.1 Volba komponent.....	37
5.2 Zástavba komponent	39
5.3 Srovnání parametrů	41
Závěr	43
Použité informační zdroje.....	44
Seznam použitých zkratk	49
Seznam použitých symbolů.....	50
Seznam příloh	53

ÚVOD

Již delší dobu společností rezonuje téma klimatické změny v důsledku lidské činnosti. Jednou z takových činností je i doprava, dnes využívající převážně spalování fosilních paliv. Posledních 30 let se proto vlády snaží omezit emise skleníkových plynů pomocí emisních norem, kvůli kterým musí vyráběné dopravní prostředky exhalovat stále menší množství emisí. S tím, jak tlak na výrobce dopravních prostředků neustále roste, spousta z nich přechází k hybridním či alternativním pohonům.

Podobné snahy o omezení emisí skleníkových plynů se však poslední dobou objevují i u motorsportu. U některých disciplín, například WRC nebo Isle of Man TT, se elektrické a hybridní speciály účastní závodu společně s auty na spalovací motor. U jiných závodních disciplín zase vznikají pro hybridní a elektrické vozy speciální kategorie, například Formule E nebo MotoE. K nim se nově, od roku 2022, přidává také dálková vytrvalostní soutěž Rallye Dakar. Ačkoli se na první pohled může zdát, že řešit emise u závodních speciálů, jejichž podíl na emisním zatížení je z globálního hlediska minimální, je nesmyslné, opak je pravdou. Právě populární závodní soutěže dávají výrobcům dopravních prostředků skvělou příležitost ukázat veřejnosti, že hybridní a alternativní pohony dávají smysl a dokážou být plnohodnotnou alternativou pro dopravní prostředek se spalovacím motorem, a to i v těžkých závodních podmínkách.

Tato práce se bude zabývat závodními kamiony pro Rallye Dakar kategorie T5.2. Hlavním cílem je vytvoření vlastní koncepce závodního kamionu v elektrickém nebo hybridním provedení, přičemž cíleno bude na maximální možnou konkurenceschopnost závodnímu kamionu běžné konstrukce se vznětovým motorem.

První kapitola se zabývá samotnou soutěží Rallye Dakar. Popisuje základní rozdělení jednotlivých kategorií, podmínky, za kterých soutěž probíhá a rozbor délek závodních etap.

Druhá kapitola popisuje závodní kamiony kategorie T5.2. Obsahuje také rozbor technických parametrů, používaných motorů, převodovek a konstrukčních řešení zástupců této třídy, což je důležité pro následný návrh koncepce.

Třetí kapitola se zaměřuje na rešerši současných elektrických nebo hybridních závodních konceptů pro Dakarskou Rallye. Je provedeno shrnutí informací poskytovaných výrobcí a jejich zhodnocení.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na energetické nároky jedné etapy a možná alternativní řešení. Obsahuje tedy podklady z Rallye Dakar 2022 a jejich analýzu. Následuje přehled alternativních řešení, jejich výpočetní ověření a zhodnocení na základě výsledků předchozí analýzy. Součástí je i výpočet parametrů komponent pro jedno zvolené alternativní řešení.

Pátá, poslední kapitola se zabývá vlastní koncepcí. Řeší volbu vhodných komponent, řešení zástavby a obsahuje zhodnocení teoretických výkonových parametrů ve srovnání s klasickým závodním kamionem.

1 RALLYE DAKAR

Rallye Dakar je dálkový vytrvalostní terénní závod, který probíhá s roční periodou. Závodu se účastní různé stroje dělí se do pěti základních kategorií, jež se následně rozlišují na podkategorie:

- motocykly,
- čtyřkolky,
- lehká vozidla: T3, T4,
- automobily: T1, T2,
- kamiony: T5.1, T5.2, T5.3 (do roku 2020 označení T4.1, T4.2, T4.3) [1].

Původně závod začínal v roce 1979 v Paříži s cílovým místem ve městě Dakar v Senegalské republice, trasa se však později opakovaně měnila. Dlouhá léta se závod konal na území afrického kontinentu, následoval jeho přesun do Jižní Ameriky a následně do Saudské Arábie [2]. Nezávisle na tom, kde se závod konal, měl ale jednu věc vždy společnou, a to náročné podmínky, jak pro jezdce, tak pro závodní stroje. Ty musí čelit vysokým teplotám, zatížení, nárazům, otřesům a nezřídka se tak stává, že některé stroje závod nedokončí z důvodu vážných poruch a poškození [3].

Trasa závodu se dělí do několika etap, každá z nich se skládá z přejezdu a měřeného úseku. Vzhledem k tomu, že vyjma kategorie motocyklů, čtyřkolek a lehkých vozidel nejsou k dispozici přestávky pro tankování během měřeného úseku, musí být automobily a kamiony schopny překonat celý měřený úsek bez tankování [4]. Přehled délky etap a měřených úseků z vybraných ročníků je zapsán v následující tabulce [5, 6, 7]:

Tab. 1: Délky etap a měřených úseků

Etapa	2016		2020		2022	
	s_{ec} (km)	s_{em} (km)	s_{ec} (km)	s_{em} (km)	s_{ec} (km)	s_{em} (km)
1A	454	39	752	319	614	19
1B	-	-	-	-	514	333
2	803	275	401	367	791	338
3	780	364	489	404	636	255
4	521	416	676	453	707	465
5	692	447	563	353	560	346
6	786	527	830	478	620	404
7	622	322	741	546	701	402
8	892	492	713	474	830	395
9	977	406	891	415	491	287
10	751	449	608	534	759	375
11	759	292	744	379	501	346
12	786	64	447	374	680	164

Kde s_{ec} je celkovou délkou etapy a s_{em} je délkou měřeného úseku. Buňky s oranžovým zvýrazněním jsou maximální hodnoty s_{ec} v daném roce. Buňky se žlutým zvýrazněním jsou maximální hodnoty s_{em} v daném roce. Z tabulky lze vidět, že celkový nejvyšší denní nájezd

dosáhl téměř 1 000 km a nejdelší měřený úsek měl necelých 550 km. Tato informace je pro návrh koncepce vozidla elektrické či hybridní koncepce zcela klíčová. Vozidlo musí být schopné projet bez zastávky měřený úsek a během přejezdu rychle doplnit energii potřebnou pro pokračování v cestě. Pokud není rychlého doplnění energie schopné, musí jeho dojezd vystačit na celkovou délku etapy až do společného tábora (bivaku), kde je prostor pro několikahodinovou přestávku v závislosti na čase příjezdu, což nabízí možnost pomalejšího doplňování energie, např. během spánku posádky.

2 KATEGORIE T5.2

Tato kategorie bude vzorem pro navrhovanou koncepci, protože do ní spadá naprostá většina závodních kamionů, jež se soutěže účastní. Nejedná se o produkční kamiony, nýbrž o prototypy, které s produkční verzí sdílí pouze kabinu a několik málo dalších komponent. Všechny klíčové komponenty musí vyhovovat speciální regulaci, kterou sice vydává FIA (Fédération Internationale de l'Automobile), ale podle návrhu ASO (Amaury Sport Organisation). To je zásadní rozdíl oproti kategorii T5.1, ve které jezdí produkční kamiony vyhovující standartním regulacím FIA [1].

Maximální rychlost je z bezpečnostních důvodů elektronicky omezena na $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [1, 5, 8]. Minimální pohotovostní hmotnost bez posádky je dle pravidel $8\,500 \text{ kg}$ [9, s. 52], běžně se ale pohybuje mezi $9\,300 \text{ kg}$ až $10\,200 \text{ kg}$ [8, 10, 11, 12]. Celkové rozměry se pohybují okolo $6\,900 \text{ mm}$ u délky, $2\,550 \text{ mm}$ u šířky, $3\,000 \text{ mm}$ u výšky a $4\,300 \text{ mm}$ u rozvoru [10, 12]. Mezi nejznámější zástupce patří například kamiony Kamaz, Tatra, IVECO, MAN a DAF.

2.1 MOTOR A PŘEVODOVKA

Použitá motorizace se mezi jednotlivými výrobci liší, ale její parametry jsou velmi podobné. V dnešní době se u většiny kamionů jedná o čtyřtákní vznětové řadové šestiválcové motory, maximální objem je omezen na $13\,000 \text{ cm}^3$ [9, s. 49]. V následujících odstavcích jsou uvedeny základní parametry motorů a převodovek u tří vybraných vozidel.

Kamaz v současné době využívá motor DCEC ISZ-13 o objemu $12\,980 \text{ cm}^3$, výkonu 770 kW při 2400 min^{-1} a točivém momentu $4500 \text{ N}\cdot\text{m}$ při 1500 min^{-1} [10]. Spotřeba motoru může při maximálním zatížení dosahovat hodnot okolo 200 litrů na 100 km [11]. Hmotnost samotného motoru bez provozních náplní je přibližně $1\,195 \text{ kg}$ [13]. Motor je spojen s blíže nespecifikovanou automatickou převodovkou a manuální dvoustupňovou rozdělovací převodovkou ZF VG 1600 [10].



Obr. 1: Motor typu DCEC ISZ-13 [13]

Tým Buggyra s vozidlem Tatra Phoenix používá motor GYRTECH Rally Power MK21-3EC o objemu $12\,500 \text{ cm}^3$, výkonu 730 kW a točivém momentu $4500 \text{ N}\cdot\text{m}$. Motor je spojen s automatickou šestnáctistupňovou převodovkou a manuální dvoustupňovou rozdělovací převodovkou TATRA/TALOSA [8, 14].

Týmy s vozy IVECO Powerstar používají motor IVECO Cursor 13 o objemu 12 900 cm³. Tento motor je používán už několik let, jeho původní výkon 600 kW při 2200 min⁻¹ byl později navyšován až na současných 783 kW. Motor je spojen s automatickou šestnáctistupňovou převodovkou a manuální dvoustupňovou rozdělovací převodovkou ZF VG 1600 [12, 15].

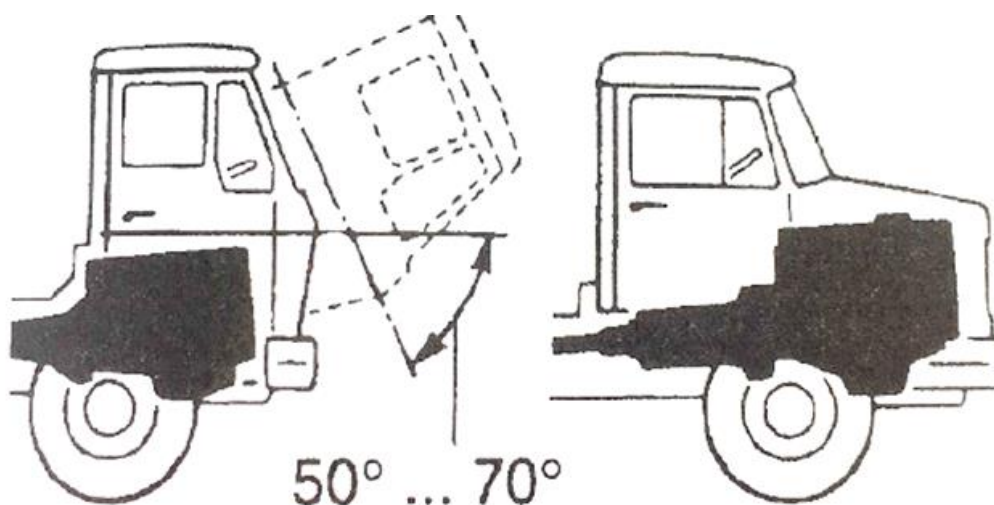
2.2 KONSTRUKCE

Základní konstrukce kamionů se v průběhu let výrazněji neměnila, jisté změny ale proběhly na designu. V současnosti se začíná častěji objevovat protáhlá příď (tzv. kapotová kabina), což vede k posunutí místa pro sezení posádky více ke středu kamionu. Dalším důsledkem je pak i zkrácení nákladového prostoru, to však z hlediska závodu není významné, protože je vždy téměř prázdný [1].

2.2.1 KABINA

Prostor, ve kterém sedí posádka. Ačkoli to na první pohled nemusí být zcela zřejmé, nároky kladené na její konstrukci jsou velmi vysoké. Vzhledem k tomu, že se často jedná o nejvyšší bod kamionu, musí být lehká, aby příliš neovlivňovala vertikální polohu těžiště. Zároveň však musí být dostatečně pevná, aby v případě vážné nehody a převrácení vozidla nedošlo k tak významné deformaci, která by ohrozila posádku. Důležitý je také způsob uchycení, musí být dostatečně pevný, a přitom omezovat přenos vibrací a rázů do kabiny.

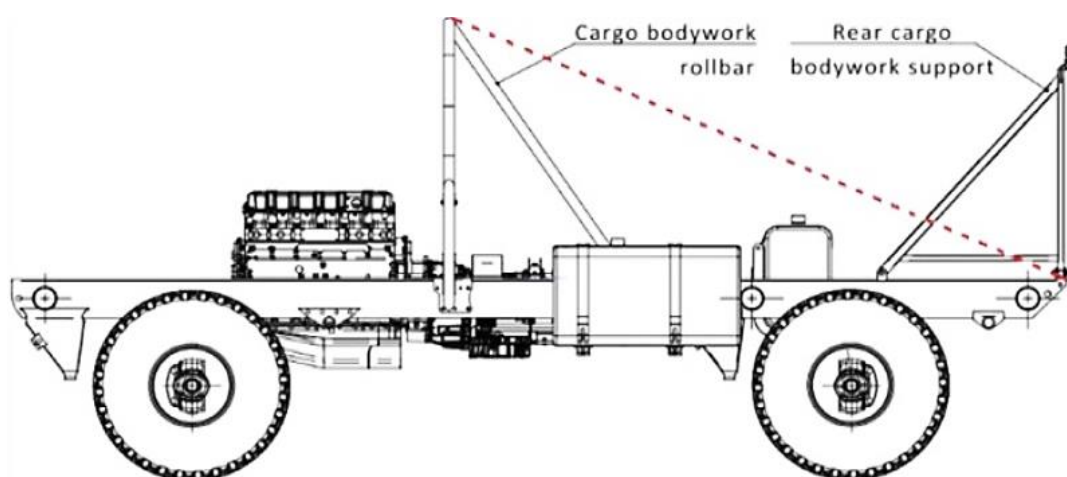
Používá se proto pevného vnitřního ochranného rámu [14], kombinovaného s kabinou z produkční verze kamionu. Ta je většinou vyrobena z tenkého ocelového plechu [16, s. 29], některé její další díly (např. kapota) mohou být i laminátové [17, s. 29], případně z plastu [18, s. 29]. Vepředu je kabina uložena pružně přes silentbloky ve vyklápěcím mechanismu, díky kterému je umožněn přístup k motoru, vzadu je uložena částečně pohyblivě na tlačných pružinách v kombinaci s hydraulickými tlumiči [12, 14, 19].



Obr. 2: Čelní kabina (trambus) a kapotová kabina s uložením motoru [19, s. 123]

2.2.2 NÁKLADOVÝ PROSTOR

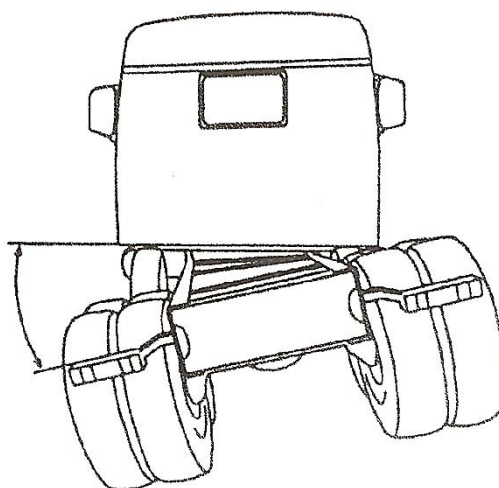
Je většinou téměř prázdný, pouze v jeho zadní části, až za zadní nápravou, bývají uložena těžká rezervní kola [10], což napomáhá k dosažení rozložení hmotnosti 50:50 [11]. Délka prostoru se u vozidel s čelní kabinou pohybuje okolo 4 500 mm [16, s. 38]. Povinnou součástí je ocelový bezpečnostní rám v přední části nákladového prostoru, který omezuje poškození při převrácení vozidla přes střechu [9, s. 47]. S ohledem na minimalizaci poškození při nehodě se však často používají rámy dva, viz obr. 3. Opláštění nákladového prostoru je pak řešeno plachtou, případně je vyrobeno z lehkých materiálů, například z hliníku kombinovaného s plastem, [16, s. 39].



Obr. 3: Bezpečnostní rámy v nákladovém prostoru [20, s. 3]

2.2.3 RÁM

Zpravidla se používá rám žebřinové konstrukce, skládající se ze dvou podélných nosníků s proměnnou výškou a několika příčných [16, 17, 18]. Materiálem bývá vysokopevnostní ocel [12]. U nákladních vozidel určených pro použití v terénu často dochází k pružné deformaci rámu krutem [19, s. 131].



Obr. 4: Deformace rámu krutem [19, s. 132]

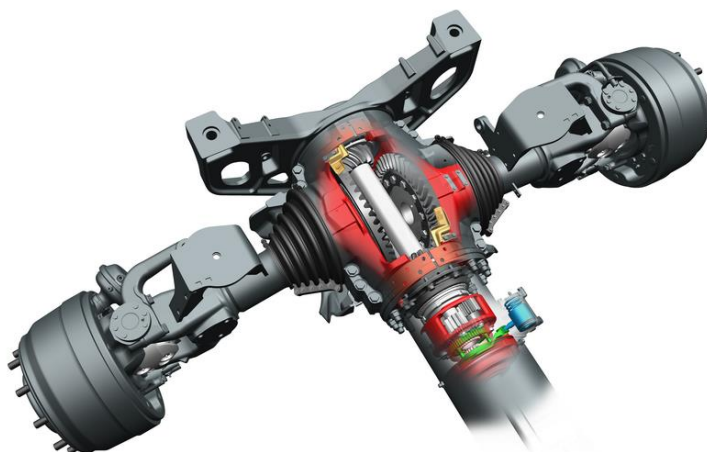
2.2.4 NÁPRAVY A ŘÍZENÍ

U naprosté většiny závodních kamionů se používají pouze dva typy náprav a odpružení. Prvním typem jsou nedělené tuhé nápravy, tedy náprava je jedním kusem i s obalem rozvodovky a diferenciálu [19, s. 145]. Zpravidla se kombinuje s odpružením pomocí dvojice listových pružin a tlumením pomocí čtveřice tlumičů na nápravu. Používá se jak pro přední, tak pro zadní nápravu [12, 16, 18]. Toto řešení je velmi jednoduché, mechanicky odolné a prostorově nenáročné. Jeho velkou nevýhodou je, že se kola nemohou pohybovat nezávisle.



Obr. 5: Zadní tuhá náprava z vozu Kamaz 4911 [16, s. 54]

Druhým typem je koncepce Tatra, která využívá centrální nosnou rouru a výkyvné polonápravy. Toto řešení bývá kombinováno s odpružením pomocí dvojice vzduchových měchů a tlumením pomocí čtveřice tlumičů na každou nápravu [14, 17]. Hlavní výhodou oproti tuhé nápravě je fakt, že odpružení koncepce Tatra je nezávislé, přesto však mechanicky velmi odolné a jednoduché. Centrální nosná roura je navíc velmi tuhá a zpevňuje tak celou konstrukci kamionu. Nevýhodou je o něco větší prostorová náročnost, vyplývající z velikosti centrální roury a případného použití stabilizátorů [17, 21].



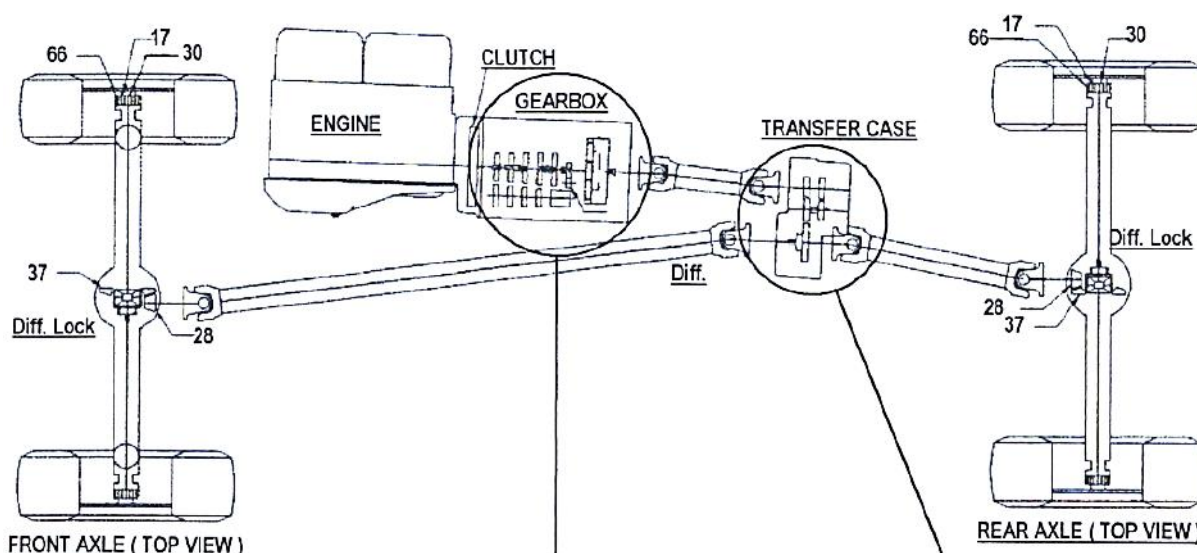
Obr. 6: Přední náprava koncepce Tatra [21]

Přední náprava je řízená, využívá se většinou monobloků ZF v podobě hřebenového řízení nebo řízení se šroubem a maticí s oběžnými kuličkami. Vždy je použit hydraulický posilovač řízení [14, 16, 17, 18]. Ten je však v těžkém terénu značně zatěžován, a proto hydraulický okruh posilovače řízení potřebuje svůj vlastní chladič [22].

2.2.5 POHON

Všechny závodní kamiony mají stálý pohon obou náprav, případně pohon jedné nápravy s možností připojení nápravy druhé [12, 23]. Jak je již zmíněno v kapitole 1.1.1, z motoru a převodovky je točivý moment přenášán na rozdělovací převodovku, jejíž funkcí je rozdělení točivého momentu mezi přední a zadní nápravu. Její součástí může být mezinápravový diferenciál, novější závodní kamiony však většinou používají rozdělovací převodovku ve verzi bez diferenciálu [12, 16, 18]. Mají tedy stálý pohon pouze zadních kol a k tomu připojitelný pohon přední nápravy pro jízdu v terénu. Připojení přední nápravy na pevném povrchu by mělo za následek namáhání pohonného ústrojí a zvýšené opotřebení pneumatik, protože při průjezdu zatáčkou přední a zadní kola opisují kružnice s různým poloměrem.

Následně je točivý moment přes kloubové hřídele přenášán k přední a zadní nápravě. Zde se nachází rozvodovky s kuželovými diferenciály, které jsou vybaveny ručně nebo pneumaticky ovládanými uzávěrkami [16, 18]. Výjimku tvoří vozy s koncepcí Tatra, kde jsou diferenciály planetové (taktéž s uzávěrkou) a jsou umístěny v centrální nosné rouři, viz obr. 6 [21].



Obr. 7: Schéma pohonu vozu Iveco MP190E44W [18, s. 18]

2.2.6 PALIVOVÉ NÁDRŽE

Celkový objem není nijak omezen, používá se však 700 l až 1 000 l [7, 10, 12]. Nádrž musí být dostatečně pevně uchycena přímo k rámu. V případě umístění mimo vozidlo je jediné dovolené místo mezi koly, nádrže navíc musí být opatřeny ochranou proti proražení nebo jinému poškození [9, s. 50].

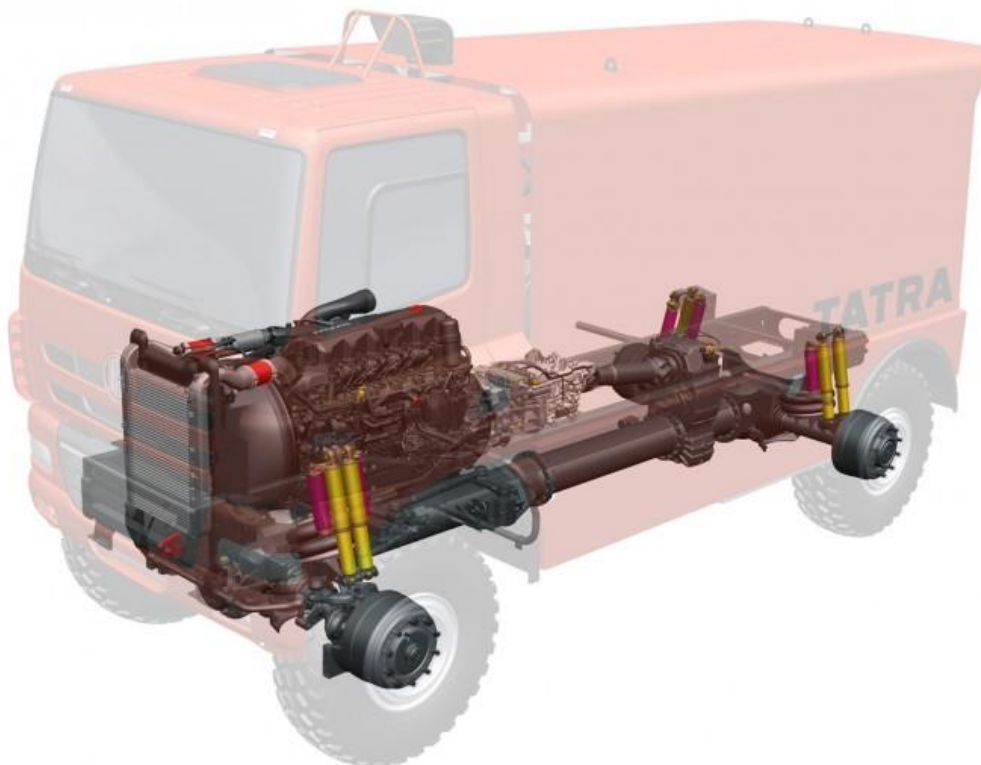
Nejčastější je umístění nádrží před zadními koly, viz obr. 3. Jedná se o výhodné místo, protože hmotnost paliva pomáhá rozložení hmotnosti 50:50, zároveň není příliš daleko od těžiště vozidla a nedochází tedy k významnému posouvání horizontální polohy těžiště při postupném spotřebovávání paliva [7, 10].

2.2.7 BRZDY

Používají se jak brzdy bubnové [10, 16, 17, 18], tak brzdy kotoučové [8], viz obr. 5 a obr. 6. Ovládání brzd je zpravidla pneumatické, což umožňuje při minimální ovládací síle pedálu dosáhnout vysokých brzdných výkonů. Přináší to však nutnost instalace zásobníků stlačeného vzduchu, které se dále využívají i pro systém pro změnu tlaku vzduchu v pneumatikách [10, 24, 25].

2.2.8 ZÁSTAVBOVÝ PROSTOR

Na obr. 8 je zobrazen závodní kamion Tatra tak, že je vidět jeho celková konstrukce, skládající se zejména z výše rozepsaných částí. Je zřejmé, že nejvíce místa zabírá pohonné ústrojí, tedy motor s převodovkou, rozdělovací převodovkou a centrální nosnou rourou. Nejvíce volného místa je v oblasti nákladového prostoru, ten už je však poměrně vysoko a zástavba těžších komponent (např. baterií) do této oblasti by negativně ovlivnila vertikální polohu těžiště, a tedy i stabilitu kamionu při jízdě. Právě proto je základní znalost konstrukčních prvků závodních kamionů, zmíněných v této kapitole, důležitá i pro návrh elektrické nebo hybridní koncepce. Nejde pouze o provedení energetického návrhu a výběr vhodných komponent, ale také o realizovatelnost. Ta přímo souvisí s možnostmi zástavby, které jsou, jak je z obr. 8 zřejmé, značně omezeny.



Obr. 8: Zobrazení vnitřních částí závodního kamionu Tatra Phoenix [15]

3 NÍZKOEMISNÍ A HYBRIDNÍ KONCEPTY

ASO vytvořila pro Rallye Dakar 2022 novou kategorii označovanou jako T1-E, která je určena pro nízkoemisní a hybridní prototypy automobilů a kamionů. V současné době pro tuto kategorii neexistuje žádný homologační předpis, který by upravoval požadavky na konstrukci a technická řešení prototypů. V příštích letech je v plánu ponechat T1-E pouze pro automobily a pro vozy ostatních konstrukcí vytvořit samostatné nízkoemisní kategorie T3-E, T4-E, T5-E. Cílem je, aby od roku 2026 startovali všichni elitní jezdci na nízkoemisních konceptech a od roku 2030 se již soutěže účastnila pouze nízkoemisní vozidla [26, 27].

3.1 AUTOMOBILY

V rámci automobilů existuje zatím pouze jeden zástupce, a to Audi RS Q e-tron. Ačkoliv není prvním hybridním vozem na Dakaru (viz 3.2.1), je společnost Audi v rámci snahy o snížení emisí na Rallye Dakar považována za průkopníka, protože se jako první zavázala připravit nízkoemisní závodní vozidlo s čistě elektrickým pohonem kol pro tuto soutěž [28, s. 2], čímž se také výrazně zasadila za vznik nové kategorie T1-E.

Model RS Q e-tron je hybridní závodní automobil. Technicky se jedná o vůz kategorie EREV (Extended Range Electric vehicle). Přestože byl zkonstruován speciálně pro Rallye Dakar a startuje ve společné kategorii T1-E, splňuje i homologaci FIA pro kategorii T1.U (vozy kategorie T1 s elektrickým pohonem kol) [28, s. 6], což vozu potenciálně umožňuje účast i v jiných soutěžích. Využívá spalovacího zážehového motoru, který je spojen s elektrickým generátorem a dobíjí vestavěný akumulátor. energii z akumulátoru následně využívají elektromotory, které auto pohání. Tento způsob pohonu je pouze s drobnými úpravami na generátoru převzat z jiného modelu společnosti Audi, e-tronu FE07, který závodí v soutěži Formula E a v praxi se již osvědčil [29].

Použitým motorem je Audi 2.0 TFSI DTM (Deutsche Tourenwagen Masters). Jedná se o řadový čtyřválcový zážehový motor o objemu 2000 cm³ s přeplňováním pomocí turbodmychadla, které dodává maximální absolutní tlak 350 kPa. Hmotnost motoru je pouze 85 kg, při závodech DTM dosahuje výkonu až 450 kW okolo 9 500 min⁻¹, přičemž spotřeba paliva je dle regulace DTM do 95 kg·hod⁻¹ [31, 32]. Při použití v modelu RS Q e-tron je však výkon tohoto motoru výrazně omezen a to na 200 kW [22]. Jeho otáčky jsou udržovány mezi 4 500 min⁻¹ a 6 000 min⁻¹, což je dle výrobce optimální z hlediska měrné efektivní spotřeby paliva, jejíž hodnotu udává jako „méně než 200 g·kW⁻¹·h⁻¹“ [28, s. 4].



Obr. 9: Motor Audi 2.0 TFSI DTM [30]

Motor je spojen s generátorem, který tvoří jednotka Audi MGU05 (motor-generator unit) o hmotnosti 35 kg a maximálním výkonu 220 kW [28, 32, 33]. Ten je oproti maximálnímu výkonu spalovacího motoru mírně naddimenzován, pravděpodobně z důvodu vyšší účinnosti mimo oblast maximálního zatížení. Pro pohon automobilu jsou použity 2 jednotky, taktéž MGU05, jejichž výstupní výkon na kola je omezen na 288 kW. Jedna pohání přední nápravu, druhá zadní nápravu. Nápravy tedy nejsou mechanicky propojeny, auto má inteligentní řídicí software, který umí regulovat otáčky jednotlivých náprav i rozložení výkonu mezi nápravami a prakticky tak tvoří virtuální mezinápravový diferenciál. Celková účinnost systému generátoru MGU a pohonných jednotek MGU je velmi dobrých 97 % a nepředpokládá se, že by byl prostor k dalšímu zlepšení. Převodový stupeň je pouze jeden. Auto při brždění využívá rekuperaci [28, s. 5], tedy přeměnu kinetické energie vozidla na energii elektrickou, kterou ukládá zpět do akumulátoru.

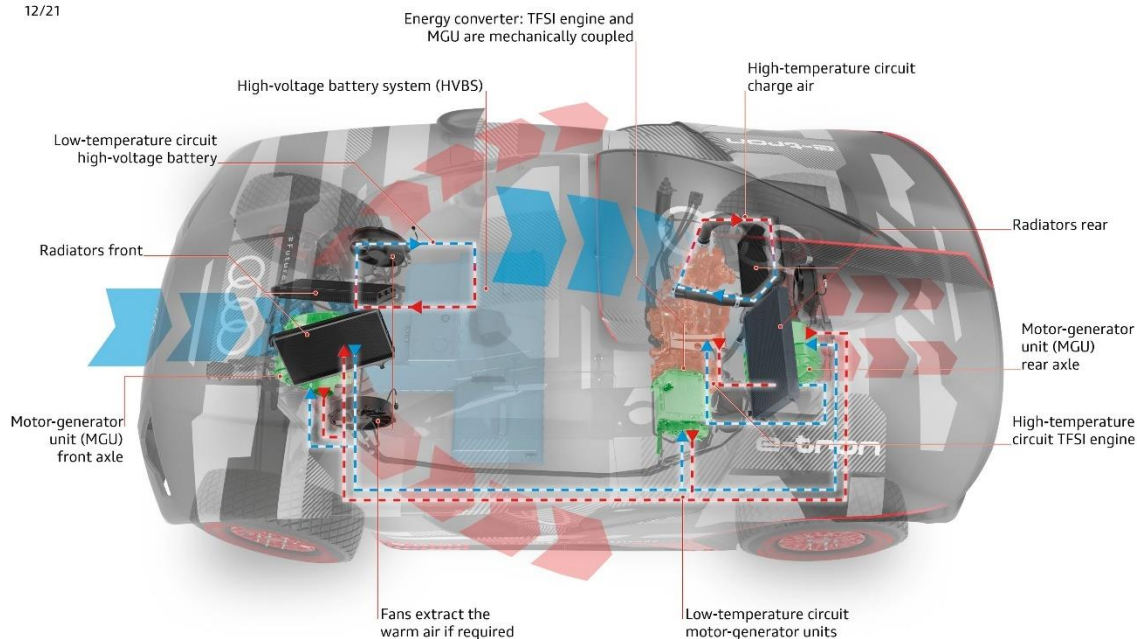
Akumulátor HVBS (High Voltage Battery System) využívá články typu li-ion (lithium ion) o jmenovitém napětí 800 V. Má kapacitu 52 kWh a hmotnost 370 kg včetně chladicího média [32]. Právě chlazení je u vozidla této koncepce náročnou úlohou, neboť je využito celkem šest samostatných chladících okruhů:

- nízkoteplotní okruh pro HVBS,
- nízkoteplotní okruh pro MGU,
- okruh pro posilovač řízení a hydraulické hevery,
- okruh klimatizace,
- vysokoteplotní okruh pro chladicí kapalinu spalovacího motoru,
- vysokoteplotní okruh chlazení stlačeného vzduchu [22].

Audi RS Q e-tron

Cooling concept

12/21



Obr. 10: Systém chlazení u vozu Audi RS Q e-tron [22]

Jednou z největších výzev je řídicí software pohonu. Ten přináší velký potenciál snížení spotřeby a emisí pomocí efektivního managementu pohonných částí vozidla. Jedná se například o nastavení rekuperace, možnosti snižování otáček nebo úplného vypnutí motoru v závislosti na stavu nabití baterie a využívaném výkonu. V současnosti je situace taková, že akumulátor je přes noc nabit do plné kapacity a auto se snaží v průběhu etapy stav nabití udržovat nad stanovenou mez. V situacích, kdy je vyžadováno dodání většího výkonu, než je výkon generátoru, pokryje tento výkyv energie z akumulátoru. Následně se dobíjí zpět při úsecích, kdy není vyžadován tak velký výkon. Poměr elektrické energie uložené v akumulátorech a energie využitě spalováním benzínu lze snadno spočítat. Energie v 1 l benzínu je $32\,340 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [34, s. 151], jednotkové odvození převodu na kWh ze základních vztahů:

$$W = J \cdot s^{-1} \quad (1)$$

$$Wh = J \cdot h \cdot s^{-1}$$

$$Wh = J \cdot h \cdot 3600 \cdot h^{-1}$$

$$Wh = 3600 \cdot J$$

Tedy $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$. Pomocí vztahu (2) je vyjádřeno množství energie v 1 litru benzínu $E_{b(\text{kWh})}$, po dosazení do vztahu vychází

$$E_{b(\text{kWh})} = \frac{E_{b(\text{J})}}{3600} \quad (2)$$

$$E_{b(\text{kWh})} = \frac{32\,340}{3600} = 8,98$$

$$E_{b(\text{kWh})} = 8,98 \text{ kWh.}$$

Kapacita palivové nádrže automobilu je 295 litrů [28], vztah (3) pak vyjadřuje celkovou energii benzínu v plně natankovaných palivových nádržích E_{bA} :

$$E_{bA} = 295 E_{b(\text{kWh})} \quad (3)$$

$$E_{bA} = 295 \cdot 8,98 = 2\,649,1$$

$$E_{bA} = 2\,649 \text{ kWh.}$$

Ze známé energie uložené v plně nabitém akumulátoru E_{aA} (52 kWh) a množství energie benzínu uloženého v palivových nádržích E_{bA} lze ze vztahu (4) zjistit celkové množství energie ve vozidle E_{cA} :

$$E_{cA} = E_{bA} + E_{aA} \quad (4)$$

$$E_{cA} = 2649 + 52 = 2701$$

$$E_{cA} = 2701 \text{ kWh,}$$

přičemž zjištěná hodnota je dále využita ve vztahu (5) ke zjištění procentuálního vyjádření energie v akumulátoru vůči celkovému množství energie ve vozidle $E_{aA(\%)}$:

$$E_{aA(\%)} = \frac{E_{aA}}{E_{cA}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$E_{aA(\%)} = \frac{52}{2701} \cdot 100 = 1,93$$

$$E_{aA(\%)} = 1,93 \%$$

Z toho vyplývá, že teoreticky pouze necelá 2 % energie jsou z akumulátoru dobitého přes noc a zbytek je dodáván spalováním fosilního paliva. V praxi je to navíc ještě méně, protože auto nikdy nedojede etapu s prázdným akumulátorem a ze sítě se tak v noci dobíjí pouze část. Na první pohled by tedy se mohlo zdát, že to je velmi málo a mohla by vyvstat otázka, jaký to má vlastně smysl, když vozidlo stejně naprostou většinu energie získá z fosilních paliv. To je však nesprávný pohled na věc, reálná emisní úspora vychází z toho, že spalovací motor pohánějící generátor běží vždy v optimálním rozsahu otáček, kde dosahuje nejvyšší účinnosti.

V porovnání s tím, motor klasického vozidla kategorie T1 je značně větší. Například u Toyoty GR DKR Hilux T1+ se jedná o zážehový přeplňovaný vidlicový šestiválec o objemu 3 500 cm³ a výkonu 298 kW. Při využití jeho maximálního výkonu budou spotřeba a tedy i emise výrazně vyšší [36], protože má o 98 kW více než Audi 2.0 TFSI DTM a pravděpodobně velmi podobnou měrnou efektivní spotřebu paliva. Naopak, v úsecích, kde není potřeba využívat vysoký výkon, nebude mít optimální otáčky a bude pracovat v režimu s nižší účinností, než by měl hybrid Audi běžící stále v ideálním pásmu otáček, který navíc část energie rekuperuje zpět při každém brzdění.

Z výrobcem udávaných parametrů lze též spočítat, za jak dlouhý časový úsek by došlo k úplnému vybití akumulátoru při využívání maximálního výkonu automobilu. Prvním krokem je zjištění účinnosti jedné jednotky MGU η_{MGUA} ze známé účinnosti celé soustavy. Vzhledem k tomu, že nejsou známy účinnostní charakteristiky použitých MGU, je pro zjednodušení uvažována stejná účinnost generátoru i pohonných jednotek. Vztah je pak formulován rovnicí (6):

$$\eta_{MGUA} = \sqrt{\eta_{cA}} \quad (6)$$

$$\eta_{MGUA} = \sqrt{0,97} = 0,985 (-),$$

kde η_{cA} je celková účinnost pohonu udávaná výrobcem [28, s. 5]. Následně lze pomocí vztahu (7) vyjádřit společný příkon obou pohonných jednotek P_{0A} :

$$P_{0A} = \frac{P_{mA}}{\eta_{MGUA}} \quad (7)$$

$$P_{0A} = \frac{288}{0,985} = 292,39$$

$$P_{0A} = 292,39 \text{ kW},$$

kde P_{mA} je společný výkon obou pohonných jednotek [28, s. 5]. Dobíjecí výkon generátoru P_{dA} je vyjádřen vztahem (8):

$$P_{dA} = P_{EA} \cdot \eta_{MGUA} \quad (8)$$

$$P_{dA} = 200 \cdot 0,985 = 197$$

$$P_{dA} = 197 \text{ kW},$$

kde P_{EA} je efektivní výkon spalovacího motoru [22]. Rozdíl mezi dodávaným a odebíraným výkonem z akumulátoru P_{rA} je:

$$P_{rA} = P_{0A} - P_{dA} \quad (9)$$

$$P_{rA} = 292,39 - 197 = 95,39$$

$$P_{rA} = 95,39 \text{ kW}.$$

Posledním krokem výpočtu je určení času do úplného vybití akumulátoru při využívání plného výkonu elektrických motorů t_{vA} dle vztahu (10):

$$t_{vA} = \frac{E_{aA}}{P_{rA}} \quad (10)$$

$$t_{vA} = \frac{52}{95,39} = 0,55$$

$$t_{vA} = 0,55 \text{ h} = 33 \text{ min},$$

kde E_{aA} je energie uložena v plně nabitém akumulátoru. Z toho vyplývá, že za 33 minut jízdy na plný výkon elektromotorů by došlo ke spotřebování veškeré energie z akumulátoru. V praxi tento čas bude ještě kratší, protože řídicí elektronika nedovolí pokles napětí akumulátoru na tak nízkou hodnotu a začne regulovat výkon elektromotorů tak, aby se akumulátor začal znovu dobíjet [32]. Audi tedy musí mít velmi dobře zanalyzovány energetické nároky etap i dobu využívání plného výkonu a podle toho zvolenou kapacitu akumulátoru a výkon spalovacího motoru.

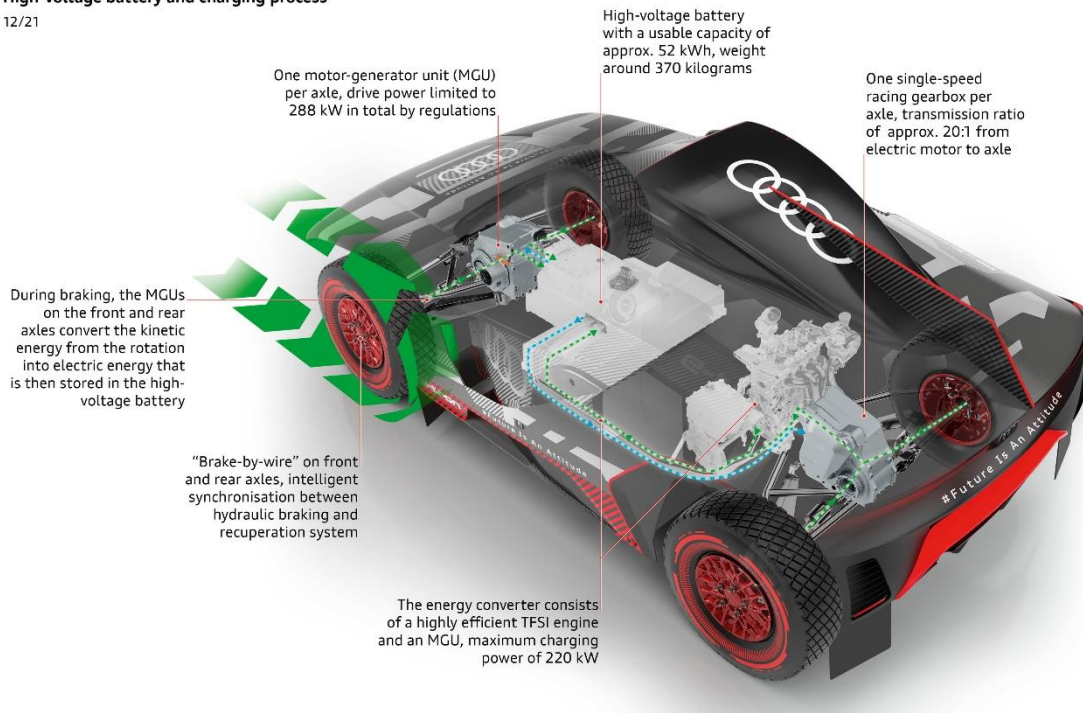
A z výsledků Rallye Dakar 2022 je zřejmé, že se to Audi povedlo. Všechna tři nasazená vozidla zvládla úspěšně dokončit soutěž, jezdci chválí nový elektrický pohon, vysoký točivý moment a výborné vlastnosti vozidla v pouštních dunách. Posádky Audi vyhrály tři etapy a v denních výsledcích získaly celkem čtrnáctkrát umístění na stupni vítězů. Přestože vůz stále využívá spalovací motor, emisní úspora zde bezpochyby je, ačkoliv výrobce bohužel neudává konkrétní čísla. Navíc lze očekávat, že Audi využije získaných dat a zkušeností k dalším úpravám, vylepšování parametrů pohonu a snižování emisí. Jedná se o zajímavý koncept a kompromis v půli cesty mezi spalovacím motorem a čistě elektrickým pohonem. Ten je totiž zatím, jak říká Lukas Folie, bateriový inženýr Audi, nereálný: „*It is not possible with today's battery technology to realize an all-electric BEV (Battery-powered Electric Vehicle) off-road vehicle for the Dakar Rally under these conditions.*“ [32]



Audi RS Q e-tron

High-voltage battery and charging process

12/21



Obr. 11: Pohon vozu Audi RS Q e-tron [32]

3.2 KAMIONY

V kategorii kamionů je situace odlišná, v současné chvíli existují tři různé koncepty. Jedná se o Renault C460 Hybrid Edition, Gaussin H2 Racing Truck a kamion české firmy HE3DA, přičemž každý z konceptů používá zcela odlišnou technologii.

3.2.1 RENAULT C460 HYBRID EDITION

Renault C460 Hybrid Edition je závodní kamion zkonstruovaný českou firmou MKR Technology pro Rallye Dakar. Jedná se o vůbec první hybridní prototyp, který se soutěže účastnil, prvně v roce 2020. Na rozdíl od koncepce Audi však kola pohání primárně spalovací motor a elektromotor slouží pouze jako jeho doplnění [37].

Použitým motorem je Renault DXI 13, identický se závodními kamiony Renault K520 bez hybridního pohonu [37]. Jedná se o řadový šestiválcový přeplňovaný vznětový motor o objemu 12 800 cm³, výkonu 765 kW a točivém momentu 4600 N·m. Ten je kombinován s šestirychlostní automatickou převodovkou ZF Ecomat 6HP a dvoustupňovou rozdělovací převodovkou ZF VG 1600. Pomocným elektromotorem je ZF CeTrax lite o výkonu 151 kW a točivém momentu 1600 N·m. Z celkové hmotnosti 8 500 kg je 700 kg tvořeno komponenty hybridního ústrojí [38]. Další informace o použitém akumulátoru nebo výkonu generátoru výrobce neuvádí.

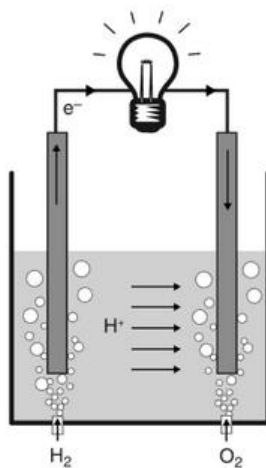
Elektromotor pracuje ve třech různých režimech. Prvním režimem je zrychlování kamionu, kdy dochází k využití vysokého točivého momentu, který má elektromotor i v nízkých otáčkách, k podpoře akcelerace. Následně s rostoucími otáčkami a výkonem spalovacího motoru dochází k postupné redukci elektrické podpory. Druhým režimem je provoz na površích, které vyvolávají vysoký odpor proti pohybu, většinou se jedná o velmi jemný písek feš-feš. V tu chvíli je vyžadován maximální možný výkon a spalovací motor je provozován na svém limitu, proto dojde k ruční aktivaci podpory elektromotorem. Třetím režimem je pak brždění, kdy elektrický motor provádí rekuperaci, čímž získává část vydané energie zpět, a navíc omezuje zatížení brzd, které je u kamionu v závodních podmínkách snadné přehřát [39].

Jedná se tedy o ekvivalent systému, který je u osobních automobilů znám pod pojmem MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle) a dosahuje 5–15 % úspory emisí CO₂ [40]. V případě závodního kamionu však bude reálná emisní úspora jiná, protože je provozován za zcela odlišných podmínek a k emisní úspoře může dojít pouze při krátké chvíli během akcelerace. Konkrétní čísla výrobce neudává, lze však předpokládat, že relativní úspora bude menší než u koncepce Audi.

3.2.2 GAUSSIN H2 RACING TRUCK

Gaussin H2 Racing truck je francouzský závodní kamion s elektrickým pohonem. Nejedná se však o BEV, nýbrž FCEV (Fuel-cell Electric Vehicle), vozidlo potřebnou elektrickou energii získává v palivovém článku, který je jeho součástí [41].

Vozidlo k pohonu využívá dva elektromotory, každý o výkonu 300 kW. Jejich rozložení není udáváno, avšak lze předpokládat, že stejně jako u koncepce Audi bude jeden motor pro pohon přední nápravy a druhý pro pohon zadní nápravy, neboť je to výhodné z hlediska absence mezinápravového diferenciálu. Jako úložiště energie slouží akumulátor o kapacitě 82 kWh a nádrže s 80 kg vodíku pod tlakem 35 MPa. O dodávání elektrické energie se stará palivový článek s výkonem 380 kW, tedy zařízení které, pomocí obráceného procesu elektrolýzy přeměňuje chemickou energii paliva na elektrickou [41, 42]. Během tohoto procesu vzniká jako odpadní produkt pouze voda [43]. Výrobce udává dojezd vozidla 250 km v závodních podmínkách. Čas potřebný pro natankování pomocí speciální plnicí stanice je 20 minut [42].



Obr. 12: Schéma funkce primitivního palivového článku [43]

Základní princip pohonu je velmi podobný jako u koncepce Audi, hlavní rozdíl je pouze v tom, že na místo spalovacího motoru dodává elektrickou energii palivový článek, který má výrazně menší výkon, než je maximální výkon elektromotorů pohánějících kola. Proto je součástí i zmíněný 82 kWh akumulátor. Ten dodává elektrickou energii ve chvílích, kdy je odebíraný výkon vyšší než výkon dodávaný palivovým článkem. Naopak v situaci, kdy je využíváno méně výkonu, je akumulátor nabíjen. Stejně jako v případě koncepce Audi to znamená, že výrobce musí mít dobře zanalyzovány energetické nároky závodu, dobu využívání plného výkonu a podle toho volenou kapacitu akumulátoru, aby nedocházelo v průběhu závodu k jeho vybití a omezení výkonu.

Typ, výrobce, nebo účinnost použitých elektromotorů nejsou uvedeny. Pro potřeby výpočtu času do úplného vybití akumulátoru tedy bude uvažován předpoklad, že se jedná o moderní MGU se stejnou účinností, jako mají jednotky Audi, tedy $\eta_{MGUG} = 0,985$ (-). Výpočet společného příkonu obou pohonných jednotek P_{0G} vychází ze vztahu (11) a je analogický ke vztahu (7):

$$P_{0G} = \frac{P_{mG}}{\eta_{MGUG}} \quad (11)$$

$$P_{0G} = \frac{600}{0,985} = 609,14$$

$$P_{0G} = 609,14 \text{ kW},$$

kde P_{mG} je společný výkon obou pohonných jednotek [41]. Vzhledem k tomu, že výrobce udává dobíjecí výkon palivového článku P_{dG} [41], lze pomocí vztahu (12) vypočítat rozdíl mezi dodávaným výkonem a odebíraným výkonem z akumulátoru P_{rG} , analogicky ke vztahu (9):

$$P_{rG} = P_{0G} - P_{dG} \quad (12)$$

$$P_{rG} = 609,14 - 300 = 309,14$$

$$P_{rG} = 309,14 \text{ kW}.$$

Posledním krokem výpočtu je určení času do úplného vybití akumulátoru t_{vG} dle vztahu (13), analogicky ke vztahu (10):

$$t_{vG} = \frac{E_{aG}}{P_{rG}} \quad (13)$$

$$t_{vG} = \frac{82}{309,14} = 0,27$$

$$t_{vG} = 0,27 \text{ h} \doteq 16 \text{ min},$$

kde E_{aG} je energie uložena v plně nabitém akumulátoru [41]. Z výpočtu vyplývá, že již za 16 minut jízdy na plný výkon elektromotorů by došlo ke spotřebování veškeré energie z akumulátoru. Stejně jako v případě Audi bude tento čas v praxi ještě kratší, protože řídicí

elektronika nikdy nedovolí úplné vybití akumulátoru. Tento čas je oproti t_{VA} poloviční a posádka zřejmě bude muset věnovat značnou pozornost tomu, kolik výkonu využívá.

Tento koncept má však jeden zásadní problém, který je zřejmý z technických parametrů. Kamion má oproti tradiční koncepci se vznětovým motorem výrazně menší výkon, navíc udávaný dojezd je pro současné závodní etapy nedostatečný. To výrazně omezuje konkurenceschopnost kamionu během závodu, což si musí uvědomovat i výrobce. Jedná se tedy spíše o ukázkou budoucího potenciálu nových technologií a pojízdnou reklamu firmy Gaussin, která vyrábí nákladní a užitkové dopravní prostředky na vodíkový pohon.

3.2.3 HE3DA

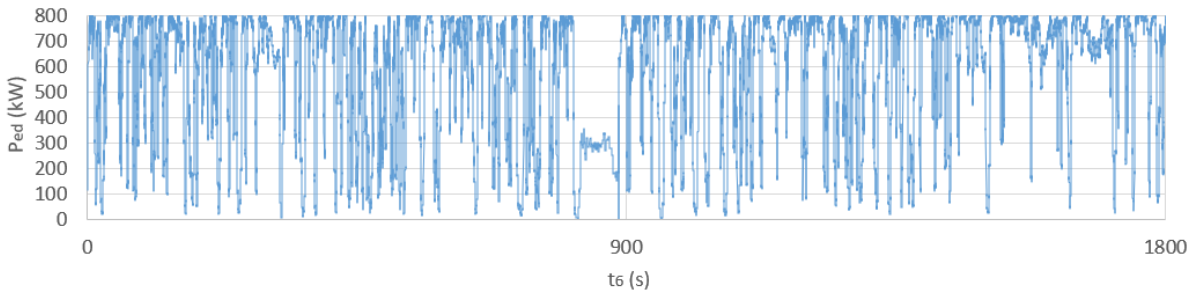
HE3DA je česká firma zaměřující se na vývoj bateriových technologií. V roce 2021 vyslala na Dakar doprovodný kamion vybavený vlastními bateriemi o kapacitě 32 kWh k testování v náročných podmínkách, které sloužily k pohonu komfortních spotřebičů v bivaku a dobíjely se fotovoltaickou soustavou o výkonu 2 kW umístěnou na střeše. Na základě pozitivních výsledků firma oznámila plán vyvinout elektrický závodní kamion pro Rallye Dakar. Dle autora projektu, Radomíra Pruse, by s dostatečnou dobíjecí infrastrukturou v místě startu a konce etap byli schopni postavit čistě elektrický kamion. Vzhledem k tomu, že tato infrastruktura dostupná není, bylo nakonec rozhodnuto o vývoji závodního kamionu stejné koncepce, jako využívá Audi. Plánem tedy byl elektrický pohon kombinovaný s baterií o kapacitě 200 kWh a prodlužovačem dojezdu typu motor-generátor. Navzdory ambiciózním tvrzením je však koncept stále jen teorií, firma zatím žádný výsledek nepředstavila, ačkoli se s kamionem plánovala účastnit Rallye Dakar 2022 [44].



Obr. 13: Návrh designu pro koncept elektrického závodního kamionu HE3DA [44]

4 VLASTNÍ ENERGETICKÉ ŘEŠENÍ

Návrh koncepce bude založen na analýze jízdnicích dat, která byla poskytnuta vedoucím. Jedná se o záznam otáček motoru, polohy plynového pedálu, rychlosti vozidla a efektivního výkonu v závislosti na čase z měřeného úseku šesté etapy z Rallye Dakar 2022. Délka této etapy s_{e6} je pouze 348 km, z tab. 1 je však zřejmé, že etapy mohou běžně dosahovat i značně delších vzdáleností. To je potřeba vzít v úvahu a volit koncepci, která umožní dojezd s_{ep} alespoň 550 km. Jízdnicí data jsou zaznamenána s frekvencí 20 Hz, celkově se jedná o 260 000 záznamů exportovaných v CSV (Comma Separated Values) souboru.



Obr. 14: Průběh efektivního výkonu v závislosti na čase během první půlhodiny závodu

4.1 ZPRACOVÁNÍ DAT

Data jsou zpracována v softwaru Microsoft Excel. Po importu dat a rozdělení CSV do jednotlivých sloupců listu je třeba provést prvotní úpravu dat. Ta spočívá v odstranění úseku před startem, po dojetí do cíle a odstranění přestávky během závodu. Tyto úseky lze v souboru snadno odhalit, především z časového průběhu polohy plynového pedálu a rychlosti vozidla. Přítomnost těchto dat s nulovými či minimálními rychlostmi je nežádoucí, neboť je zde udáván téměř nulový efektivní výkon, což by ovlivnilo některé statistické výsledky. Nyní je třeba z frekvence vypočítat časový úsek jednoho záznamu t_k , pro který platí

$$t_k = \frac{1}{f} \quad (14)$$

$$t_k = \frac{1}{20} = 0,05$$

$$t_k = 0,05 \text{ s,}$$

kde f je frekvence záznamu jízdnicích dat. Následně je třeba vypočítat celkovou energii spotřebovanou během závodní etapy E_c . Vzhledem k tomu, že jízdnicí data jsou zaznamenána s dostatečnou frekvencí, lze výpočet provést sumou všech E_s , tedy spotřebovaných energií v jednotlivých časových intervalech pomocí vztahu

$$E_c = \sum_{i=1}^n \left(E_{s_i} \cdot \frac{t_k}{3600} \right) \quad (15)$$

$$E_c = 1870,52$$

$$E_c = 1870,52 \text{ kWh,}$$

kde n je počtem naměřených hodnot v jízdách datech, v tomto případě je po úpravě dat $n = 241\,761$. Jak už však bylo zmíněno, cílem je, aby byla koncepce schopna absolvovat i ostatní, delší etapy. S ohledem na fakt, že nejsou k dispozici potřebná data z delších etap, budou energetické nároky E_{cp} na požadovaný dojezd 550 km v závodních podmínkách řešeny pouze lineární aproximací, pro kterou platí

$$E_{cp} = \frac{s_{ep}}{s_{e6}} \cdot E_c \quad (16)$$

$$E_{cp} = \frac{550}{348} \cdot 1870,52 = 2956,28$$

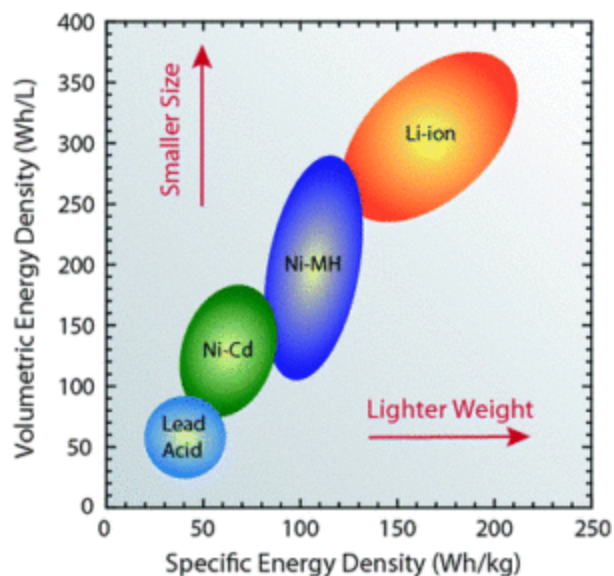
$$E_{cp} = 2956,28 \text{ kWh.}$$

4.2 MOŽNOSTI ŘEŠENÍ

Na základě zjištěných energetických nároků pro 550 km dlouhou etapu lze nyní analyzovat možná řešení, tedy BEV, FCEV a EREV a zjistit, která z nich jsou vyhovující.

4.2.1 BEV

Bateriový elektrický pohon, značně omezujícím faktorem je kapacita akumulátoru, respektive jeho rozměry a především hmotnost. Energetická hustota současných akumulátorů typu li-ion, které jsou z tohoto hlediska nejlepší, dosahuje maximálně $0,265 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ [45].



Obr. 15: Energetická hustota akumulátorů [45]

Ze známých energetických požadavků E_{cp} a energetické hustoty li-ion akumulátoru e_{li} lze spočítat hmotnost potřebných akumulátorů m_{BEV} pomocí vztahu

$$m_{\text{BEV}} = \frac{E_{\text{cp}}}{e_{\text{li}}} \quad (17)$$

$$m_{\text{BEV}} = \frac{2956,28}{0,265} = 11\,155,77$$

$$m_{\text{BEV}} = 11\,155,77 \text{ kg.}$$

Z vypočtené hmotnosti je zřejmé, že koncepce BEV je nevhodná z důvodu příliš vysoké hmotnosti akumulátoru, která překračuje běžnou startovní hmotnost kamionu, viz kapitola 2.

4.2.2 FCEV

Elektrický pohon s palivovým článkem jako prodlužovačem dojezdu. Výhodou oproti BEV je možnost použít výrazně menší kapacitu akumulátoru, což řeší problém s jeho hmotností. Samotný vodík je také velmi lehký, problematické jsou však nádrže pro jeho uložení. I kompozitní nádrže typu IV jsou stále vcelku těžké. Hlavním problémem je především velikost těchto nádrží, je tedy třeba ověřit zástavbové možnosti v závodním kamionu.

Účinnost palivového článku η_{FC} se pohybuje mezi 50–60 % a energie uložená v 1 kg vodíku E_{H_2} je 33,33 kWh [35, 46]. Z těchto dat lze vypočítat hmotnost vodíku potřebnou k absolvování 550 km dlouhé závodní etapy pomocí vztahu

$$m_{\text{H}_2} = \frac{E_{\text{cp}}}{\eta_{\text{FC}} \cdot E_{\text{H}_2}} \quad (18)$$

$$m_{\text{H}_2} = \frac{2956,28}{0,6 \cdot 33,33} = 147,83$$

$$m_{\text{H}_2} = 147,83 \text{ kg.}$$

Dostupné nádrže pro použití ve vozidlech nedosahují takových kapacit, je tedy potřebné použít větší množství menších nádrží. Pro výpočet jsou voleny nádrže Hexagon Purus Hydrogen Type 4J, které mají dobrý poměr vlastní hmotnosti vůči uloženému vodíku. Parametry nádrže jsou následující:

- pracovní tlak 35 MPa,
- kapacita vodíku 9 kg,
- hmotnost nádrže 112 kg,
- vnější průměr 0,509 m,
- délka 2,342 m [47].

Teoretický počet nádrží i_{nt} a z něj vycházející skutečný počet nádrží i_{n} je

$$i_{\text{nt}} = \frac{m_{\text{H}_2}}{m_{\text{nH}_2}} \quad (19)$$

$$i_{\text{nt}} = \frac{147,83}{9} = 16,43$$

$$i_{\text{n}} = 17 (-),$$

kde m_{nH_2} je kapacita vodíku jedné nádrže. Z celkového počtu nádrží už lze vypočítat celkovou hmotnost vodíku a nádrží m_{cH_2} pomocí vztahu

$$m_{cH_2} = (m_n \cdot i_n) + m_{H_2} \quad (20)$$

$$m_{cH_2} = (17 \cdot 112) + 147,83 = 2051,83$$

$$m_{cH_2} = 2051,83 \text{ kg},$$

kde m_n je hmotnost jedné nádrže.

Hmotnost nádrží s vodíkem přesahující dvě tuny sice vypadá na první pohled jako relativně vysoká, navíc s ohledem na fakt, že v ní není zahrnuta hmotnost palivového článku a dalšího potřebného vybavení. Avšak rozhodně není natolik omezující, aby byla tato koncepce zavržena. Je však třeba ještě vypočítat objem zabraný nádržemi V_{nH_2} . Zde je potřeba vzít v úvahu, že nádrže jsou sice válcovitého tvaru, ale bude mezi nimi vznikat volný, nevyužitý prostor a ten je potřeba taktéž započítat. Vztah má tedy tvar

$$V_{nH_2} = i_n \cdot (D_{nH_2}^2 \cdot l_{nH_2}) \quad (21)$$

$$V_{nH_2} = 17 \cdot (0,509^2 \cdot 2,342) = 10,32$$

$$V_{nH_2} = 10,32 \text{ m}^3,$$

kde D_{nH_2} je průměr nádrže a l_{nH_2} je délka nádrže. Z výpočtu je zřejmé, že se jedná o velmi velký prostor, který nádrže zabírají. Jejich zástavba je sice teoreticky možná, neboť v nákladovém prostoru kamionu je dostatek volného prostoru (viz kapitola 2.2.2), avšak umístění této hmotnosti v nákladovém prostoru by značným způsobem negativně ovlivnilo těžiště vozidla a na jiných místech není dostatek prostoru pro uložení tak velkého množství vodíku. Vzhledem k tomu, že se jedná o závodní kamion do těžkého terénu, je výrazné negativní ovlivnění těžiště nepřijatelné a tato koncepce tedy není pro současnou délku etap příliš vhodná.

Je však nutno poznamenat, že pokud by v budoucnu došlo ze strany ASO k podpoře realizovatelnosti nízkoemisních koncepcí v podobě výraznějšího zkrácení délky etap, což by vedlo ke snížení potřebné kapacity vodíkových nádrží, stala by se z FCEV zajímavá a pro kratší etapy pravděpodobně velmi dobře využitelná koncepce.

4.2.3 EREV

Elektrický pohon s prodlužovačem dojezdu, kterým je zpravidla zážehový nebo vznětový motor fungující jako generátor. Pro použití v závodním kamionu se jeví jako vhodnější motor vznětový, neboť dosahuje vyšší účinnosti a jeho vyšší hmotnost není příliš podstatná, protože je vůči vysoké pohotovostní hmotnosti kamionu relativně malá. Hlavní výhodou je především dojezd této koncepce. Pokud jsou výkon prodlužovače dojezdu a kapacita akumulátoru správně zvoleny, je jediným limitujícím faktorem dojezdu objem palivových nádrží. Ty mohou být díky vyšší efektivitě pohonu o něco menší než u klasických závodních kamionů se vznětovým motorem.

Negativně se na hmotnosti vozidla projeví nutnost zástavby akumulátoru a jednotek MGU, naopak pozitivně se projeví nahrazení těžkého motoru menším, lehčím a méně výkonným prodlužovačem dojezdu.

Z výše zmíněných důvodů je zřejmé, že tato koncepce je využitelná i pro delší etapy.

4.3 NÁVRH A KONTROLA PARAMETRŮ KOMPONENT

Z důvodů, které jsou zřejmé z kapitoly 4.2 bylo rozhodnuto o výběru koncepce EREV. Nyní je třeba provést výpočet potřebných parametrů komponent, zejména se jedná o výkon prodlužovače dojezdu, kapacitu akumulátoru a objem palivových nádrží. Tyto výpočty jsou taktéž provedeny v software Microsoft Excel, ve společném výpočetním sešitu společně se zpracováním dat.

4.3.1 VÝKON PRODLUŽOVAČE DOJEZDU

Proces zjišťování vhodného výkonu prodlužovače dojezdu se skládá z prvního návrhu výkonu, jeho výpočetního ověření a následných postupných úprav, až se dojde k vyhovujícímu výsledku. Jako první navržená hodnota je volen aritmetický průměr efektivního výkonu \bar{P}_e , jenž je 557 kW.

Prvním krokem při ověřování navržené hodnoty je zjistit, kolik energie je dodáváno a odebíráno z akumulátoru v každém časovém intervalu. To je označeno jako E_{dif} a provedeno pomocí vztahu

$$E_{dif_i} = (P_{en} - P_{ed_i}) \cdot \frac{t_k}{3600}, \quad (22)$$

kde P_{en} je navržený výkon prodlužovače dojezdu a P_{ed} je okamžitá hodnota efektivního výkonu. Znaménková konvence vyplývá z výpočtu, kladný výsledek znamená, že energie je ukládána do akumulátoru, záporný výsledek říká, že energie je z akumulátoru odebírána. V této části výpočtu však zatím není ošetřena situace, kdy je stav nabití akumulátoru 100 % a tedy do něj nelze uložit více energie. Tyto situace budou ošetřeny dodatečně v pozdější části výpočtu.

Následně je využita logická funkce SUMIF, která provádí sumu těch hodnot, které splňují zadanou podmínku. Toho je využito k roztržení hodnot záporných (energie odebíraná E_{od}) a kladných (energie ukládaná E_{dobt}). První funkce má tvar

$$E_{od} = \text{ABS}(\text{SUMIF}(E_{dif_i}; "<0")), \quad (23)$$

přičemž tato funkce provádí součet všech E_{dif} , jejichž hodnota je menší než nula. Celá funkce je navíc v absolutní hodnotě, neboť energie nemůže být zápornou, znaménko slouží pouze k rozlišení toho, jestli byla dodána nebo odebrána. Druhou funkcí je

$$E_{dobt} = \text{SUMIF}(E_{dif_i}; "> 0"), \quad (24)$$

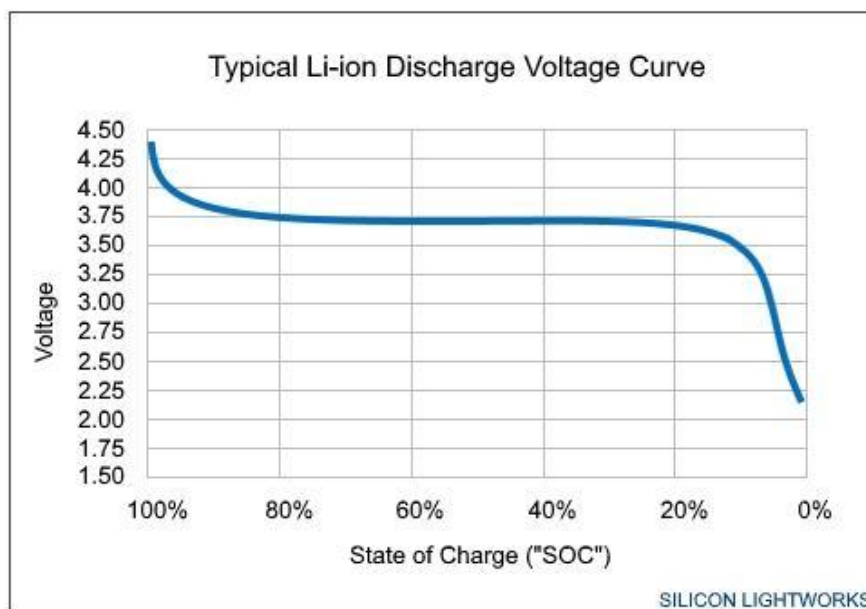
kteřá provádí součet všech E_{dif} , jejichž hodnota je větší než nula. Nyní je možné provést úpravu navrženého výkonu tak, aby hodnota E_{dobt} byla mírně vyšší než E_{od} . První navržená hodnota byla velmi blízko výsledku, postupným navyšováním bylo dosaženo výsledného navrhovaného minimální výkonu prodlužovače dojezdu $P_{en} = 560$ kW. V závislosti na tomto výkonu je výsledkem teoreticky uložená energie $E_{dobt} = 394,48$ kWh a odebraná energie $E_{od} = 384,67$ kWh.

4.3.2 KAPACITA AKUMULÁTORU

Zjištění správné kapacity akumulátoru probíhá podobným způsobem jako u výkonu prodlužovače dojezdu. Nejdříve je třeba navrhnout první hodnotu, ta se poté výpočetně ověří a postupně upravuje, než se dosáhne vyhovujícího výsledku.

U prvního návrhu minimální kapacity akumulátoru C_n již není možné vycházet z jízdních dat, jako tomu bylo u prodlužovače dojezdu. Aby byla první navržená hodnota alespoň řádově správná, je převzata ze závodního kamionu Gaussin H2 Racing Truck, tedy 82 kWh, viz kapitola 3.2.2.

Před samotným ověřováním navržené hodnoty je třeba stanovit úroveň nabití, pod kterou akumulátor v průběhu závodu nesmí klesnout. To je důležité z důvodu ochrany před nadměrným vybitím, které by způsobilo příliš velký pokles napětí a nevratné poškození akumulátoru [48]. Dalším problémem je, že s výrazněji klesajícím napětím by při stejném proudovém odběru klesal i výkon elektromotorů. Proto je na základě obrázku 15 je zvolen nejnižší dovolený stav nabití 20 %, respektive $C_d = 0,2 \cdot C_n$.



Obr. 16: Závislost napětí na stavu nabití u článku typu li-ion [48]

V rámci ověření je třeba zkontrolovat průběh stavu nabití v závislosti na čase a z toho zjistit, jestli v průběhu etapy neklesne pod 20 %. Navíc je zde třeba zohlednit, že do plně nabitého akumulátoru již nelze ukládat další energii. K tomu je využita logická funkce IF, ke které se

stanoví podmínka a výstup se liší podle toho, jestli je splněna nebo nikoliv. Je předpokládán start vozidla s plně nabitým akumulátorem, tedy okamžitá hodnota energie v akumulátoru $C_{a1} = C$. Další hodnoty C_a (od $i = 2$) jsou zjištěny funkcí

$$C_{a_i} = \text{IF} \left((C_{a_{i-1}} + E_{\text{dif}_i}) \geq C; C; C_{a_{i-1}} + E_{\text{dif}_i} \right), \quad (25)$$

kteřá zkontroluje, jestli součet energie v akumulátoru v předchozím časovém úseku a nově dodané (nebo odebrané) energie není vyšší než maximální kapacita akumulátoru. Pokud ano, energie nemůže být uložena a okamžitá hodnota energie v akumulátoru bude pouze C . Pokud ne, energie může být uložena a okamžitá hodnota energie bude součtem hodnoty předchozí a nově dodané (nebo odebrané) energie.

O samotné ověření navržené hodnoty se stará složená logická funkce, která zkontroluje, jestli nejnižší hodnota C_a není menší než C_d . Její tvar je

$$\text{IF}(\text{MIN}(C_{a_i}) < C_d; \text{"Nevyhovuje"}; \text{"Vyhovuje"}), \quad (26)$$

přičemž vrací textový výstup hodnotící správnost volby kapacity akumulátoru. Postupnými úpravami navržené kapacity bylo dosaženo výsledného $C = 97$ kWh.

Posledním krokem je zjištění, kolik energie dodávané prodlužovačem dojezdu nemůže být uloženo. V těchto chvílích by mohla řídicí elektronika prodlužovače dojezdu například krátkodobě regulovat otáčky tak, aby nedocházelo k přeměně nadbytečné energie. Tu totiž nelze nijak efektivně využít a musela by být disipována v podobě tepla. Pro výpočet energie, kterou již nelze uložit do akumulátoru, a to v každém časovém intervalu, je použita logická funkce

$$E_{z_i} = \text{IF}(E_{\text{ak}_i} = C; E_{\text{dif}_i}; 0), \quad (27)$$

kteřá v případě, že je v daném okamžiku energie uložená v akumulátoru rovna jeho maximální kapacitě, vrátí odpovídající hodnotu energie, kterou již nelze uložit. V opačném případě vrátí nulovou hodnotu. Celkovou neuloženou energii E_{z_c} pak vyjadřuje vztah

$$E_{z_c} = \sum_{i=1}^n E_{z_i} \quad (28)$$

$$E_{z_c} = 64,79$$

$$E_{z_c} = 64,79 \text{ kWh.}$$

Skutečná energie uložená v průběhu závodu do akumulátoru E_{dob} je

$$E_{\text{dob}} = E_{\text{dobt}} - E_{z_c} \quad (29)$$

$$E_{\text{dob}} = 329,69$$

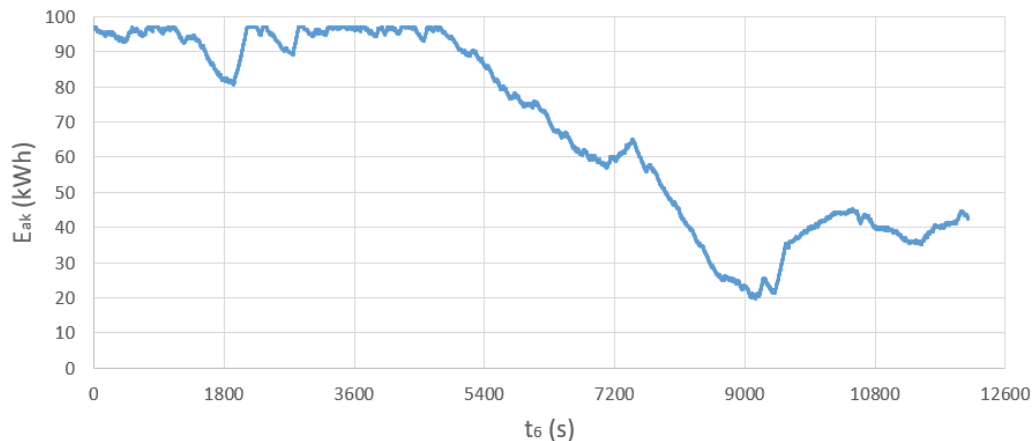
$$E_{\text{dob}} = 329,69 \text{ kWh.}$$

V průběhu etapy tedy dojde ke vzniku rozdílu mezi dodanou a odebranou energií E_{akd} , kterou bude po dojetí do cíle třeba znovu doplnit nabíječkou. Tuto energii lze vyjádřit jako

$$E_{akd} = E_{od} - E_{dob} \quad (30)$$

$$E_{akd} = 54,98$$

$$E_{akd} = 54,98 \text{ kWh.}$$



Obr. 17: Průběh energie uložené v akumulátoru v závislosti na čase

4.3.3 OBJEM PALIVOVÝCH NÁDRŽÍ

Nejprve je třeba zjistit, kolik energie prodlužovač dojezdu v průběhu etapy dodá. Prvním krokem je výpočet času, který trvalo projetí celé etapy, pomocí vztahu

$$t_6 = \frac{n \cdot t_k}{3600} \quad (31)$$

$$t_6 = \frac{241\,761 \cdot 0,05}{3600} = 3,36$$

$$t_6 = 3,36 \text{ h.}$$

Je předpokládáno, že E_z vznikat nebude, neboť v těchto chvílích dojde k automatické regulaci výkonu řídicí jednotkou. Je tedy třeba vypočtenou hodnotu E_z odečíst od energie, kterou by teoreticky prodlužovač dojezdu dodával. Z tohoto předpokladu vyplývá, že vztah pro výpočet skutečně dodané energie E_{pd} má tvar

$$E_{pd} = t_6 \cdot P_{en} - E_z \quad (32)$$

$$E_{pd} = 3,36 \cdot 560 - 64,79 = 1816,81$$

$$E_{pd} = 1816,81 \text{ kWh.}$$

Pro vznětový motor použitý jako prodlužovač dojezdu lze uvažovat jeho měrnou efektivní spotřebu paliva $m_{pe} = 0,2 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ [49]. Potřebné minimální hmotnostní množství paliva m_{pal} lze vypočítat jako

$$m_{pal} = E_{pd} \cdot m_{pe} \quad (33)$$

$$m_{pal} = 1816,81 \cdot 0,2 = 363,36$$

$$m_{pal} = 363,36 \text{ kg.}$$

Při přibližně známé hustotě motorové nafty $\rho_n = 830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [35, s. 51], je možné vypočítat minimální potřebnou kapacitu palivových nádrží pomocí vztahu

$$V_{pal} = \frac{m_{pal}}{\rho_n} \quad (34)$$

$$V_{pal} = \frac{363,36}{830} = 0,438$$

$$V_{pal} = 0,438 \text{ m}^3 = 438 \text{ l.}$$

Rekuperace energie při brždění není ve výpočtu zahrnuta, neboť nejsou k dispozici potřebná data. I kdyby k dispozici byla, výpočet by byl velmi náročný, protože vůz se pohybuje po sypkém povrchu, často dochází ke smýkání a kola se mohou nořit hluboko do písku, což vytváří velký jízdní odpor. Ačkoli rekuperovaná energie není známa, neznamená to, že v průběhu závodu nelze rekuperovat. Naopak, tato možnost by určitě měla být u navržené koncepce k dispozici, protože může přinést energetickou úsporu. Množství rekuperované energie by mohlo jít zjistit experimentálně, měřením během závodu. Následně by tato data mohla být využita při dalším ladění.

Procentuální vyjádření využití elektrické energie dodané nabíječkou ze sítě, vůči potřebné energii k absolvování etapy je

$$E_{el(\%)} = \frac{E_{akd}}{E_c} \quad (35)$$

$$E_{el(\%)} = \frac{54,98}{1870,52} = 0,0294$$

$$E_{el(\%)} = 2,94 \text{ \%}.$$

5 VLASTNÍ KONCEPCE

Nyní je třeba dle parametrů vypočtených v kapitole 4.3 vybrat vhodné komponenty a navrhnout jejich zástavbu. Je třeba vzít v úvahu, že se jedná o kompromis, volbu z dostupných, již vyráběných a veřejnosti nabízených komponent. V případě, že by mělo dojít ke skutečné realizaci návrhu, nejspíše by byly komponenty poptávány zakázkově přímo dle požadovaných parametrů, a to u specializovaných výrobců.

5.1 VOLBA KOMPONENT

První komponentou, kterou je třeba vybrat, je spalovací motor, který bude použit jako prodlužovač dojezdu. Zvolen je motor vznětový, viz kapitola 4.2.3. Hlavním požadavkem je, aby byl motor schopný dlouhodobě dodávat požadovaný výkon, respektive jeho životnost musí být alespoň taková, aby absolvoval všechny etapy jednoho ročníku závodu. Druhým požadavkem je hmotnost motoru, měla by být oproti motorům používaných u běžných závodních kamionů výrazně menší, aby byla alespoň částečně kompenzována hmotnost dalších komponent koncepce EREV. Problémem je, že bez důkladných zátěžových testů nelze říci, který motor požadavky na životnost splní. Lze tedy pouze vydedukovat, jaký motor by mohl být vhodný, a ten je potřeba dále podrobit detailnější analýze.

Vhodným motorem by mohl být Iveco Cursor 8. Jeho větší verze, Cursor 13, má maximální tovární výkon 368 kW [50], avšak ve verzi upravené pro Rallye Dakar je naladěna až na 783 kW (viz kapitola 2.1), dodává tedy 213 % továrního výkonu. Jeho hmotnost v suchém stavu je 1197 kg [51]. Cursor 8 má maximální tovární výkon 265 kW [52]. Za předpokladu, že u něj bude taktéž možno bezpečně dosáhnout 213 % továrního výkonu, stejně jako u jeho větší verze, byla by výsledkem dostačující teoretická hodnota 564 kW. Hmotnost tohoto motoru v suchém stavu je 681 kg [52], oproti větší verzi je tedy výrazně lehčí.

Akumulátory jsou voleny od firmy Lithos Energy, kapalinou chlazený typ LHV-8FP-700 v počtu čtyř paralelně zapojených kusů o společné kapacitě 98,4 kWh a celkové hmotnosti 648 kg. Napětí akumulátoru je závislé na stavu jeho nabití a pohybuje se mezi 480–806 V. Rozměry jednoho kusu jsou 1 485 x 1 485 x 97 mm [53]. Jak je z kapacity a hmotnosti akumulátoru patrné, energetická hustota akumulátoru rozhodně nepatří mezi ty nejlepší. Bohužel, mezi nabízenými akumulátory nebyla nalezena alternativa s ekvivalentním napětím a větší energetickou hustotou.



Obr. 18: Akumulátor Lithos Energy LHV-8FP-700 [53]

Jako pohon kamionu je zvolena sestava RIMAC AXL_1800. Ta se skládá z dvojice kapalinou chlazených elektromotorů RIMAC SPM_900, což jsou synchronní motory s permanentními magnety. Každý z těchto motorů má jmenovitý výkon 355 kW a maximální výkon 450 kW při napětí 800 V. Maximální točivý moment je 900 Nm, nejvyšší otáčky motoru jsou $17\,700\text{ min}^{-1}$ a hmotnost jednoho motoru je pouze 48 kg [54]. Součástí sestavy je i řídicí elektronika, jejíž celková hmotnost je 84 kg. Skládá se ze dvou identických měničů, jeden pro každý motor [55]. Poslední částí sestavy jsou dvě převodovky s převodovým poměrem 5,75. Ty jsou umístěny ve společné skříni, avšak jedna převodovka je spojena s prvním motorem, druhá s druhým motorem a výstupy jsou samostatné, pro každý motor zvlášť. Celková hmotnost této sestavy je necelých 190 kg [56].



Obr. 19: Sestava RIMAC AXL_1800 [56]

Vzhledem k tomu, že výstupní otáčky z převodovky při maximálních otáčkách motoru jsou $n_t = 3100\text{ min}^{-1}$ [56], což je pořád příliš mnoho, je třeba spočítat převodový poměr pro stálý převod v rozvodovkách, neboť klasická vícerychlostní převodovka nebude vůbec použita. Statický poloměr pneumatik je $r_{\text{pneu}} = 0,566\text{ m}$ [57]. Z toho lze dopočítat otáčky kol při maximální rychlosti $v_{\text{max}} = 140\text{ km/h}$ pomocí vztahu

$$n_{\text{kol}} = \frac{v_{\text{max}}}{120\pi \cdot r_{\text{pneu}}} \quad (36)$$

$$n_{\text{kol}} = \frac{140000}{120\pi \cdot 0,566} = 656,12$$

$$n_{\text{kol}} = 656,12\text{ min}^{-1}.$$

Když jsou známy otáčky kol a otáčky na výstupu z převodovky, lze určit maximální převodový poměr stálého převodu v rozvodovkách i_{roz} . Je však třeba vzít při výpočtu v úvahu i redukční převod v nábojích kol, jenž je $i_{\text{red}} = 1,32$ [57]. Výpočet je proveden vztahem

$$i_{\text{roz}} = \frac{n_t}{i_{\text{red}} \cdot n_{\text{kol}}} \quad (37)$$

$$i_{\text{roz}} = \frac{3100}{1,32 \cdot 656,12} = 3,60.$$

V souvislosti s pohonem je také nutno zkontrolovat točivý moment na kole při rozjezdu. Je tedy nutno zjistit, jestli elektromotor i přes absenci převodových stupňů bude schopen dodat na kolo podobný točivý moment, jako spalovací motor s vícešupňovou převodovkou. Závodní kamiony se spalovacím motorem mají sice většinou převodovky s šestnácti rychlostními stupni, za normálních okolností se však používají pouze 4 z nich, a to 10, 12, 14 a 16. Převodový poměr od motoru po kolo je při rozjezdu na 10. převodový stupeň $i_{10} = 12,2$ [57]. Předpokládá se připojený pohon přední nápravy, rovnoměrné rozdělení točivého momentu mezi kola a točivý moment motoru $M_{sm} = 4500 \text{ Nm}$, viz kapitola 2.1. Výpočet točivého momentu na kole u kamionu se spalovacím motorem je

$$M_{ksm} = \frac{M_{sm} \cdot i_{10}}{4} \quad (38)$$

$$M_{ksm} = \frac{4500 \cdot 12,2}{4} = 13\,725$$

$$M_{ksm} = 13\,725 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

U navržené koncepce je točivý moment na kole dán vztahem

$$M_{kk} = \frac{M_{em} \cdot i_{roz} \cdot i_{red} \cdot i_p}{2} \quad (39)$$

$$M_{kk} = \frac{900 \cdot 3,6 \cdot 1,32 \cdot 5,75}{2} = 12\,296$$

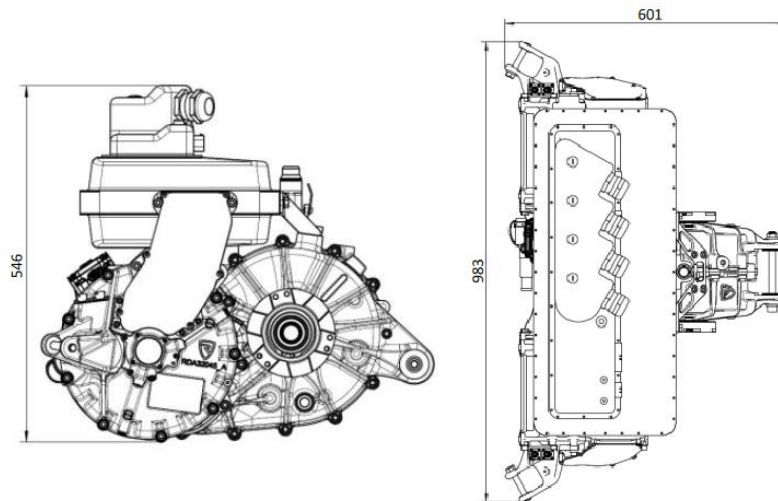
$$M_{kk} = 12\,296 \text{ N} \cdot \text{m},$$

kde M_{em} je maximální točivý moment jednoho elektromotoru v sestavě AXL_1800. Točivé momenty vychází řádově stejně. Hodnoty se liší zhruba o 10 %, což by z hlediska jízdního výkonu nemělo být významnou překážkou.

Dále je třeba zvolit elektromotor, který bude zapojen jako generátor přeměňující kinetickou energii z prodlužovače dojezdu na elektrickou. Byla zvolena dvojice elektromotorů, stejných, jako slouží k pohonu, tedy RIMAC SPM_900. Vzhledem k tomu, že pracovní otáčky tohoto elektromotoru jsou mnohem vyšší než pracovní otáčky prodlužovače dojezdu, je třeba mezi ně umístit jednoduchou převodovku se stálým převodem. Hmotnost této převodovky bude uvažována zhruba 50 kg. Elektroniku pro zapojení elektromotoru v režimu generátoru výrobce nenabízí, bylo by třeba ji poplat jako zakázkové řešení. Její hmotnost bude uvažována celkem 84 kg, stejně jako u řídicí elektroniky pohonu.

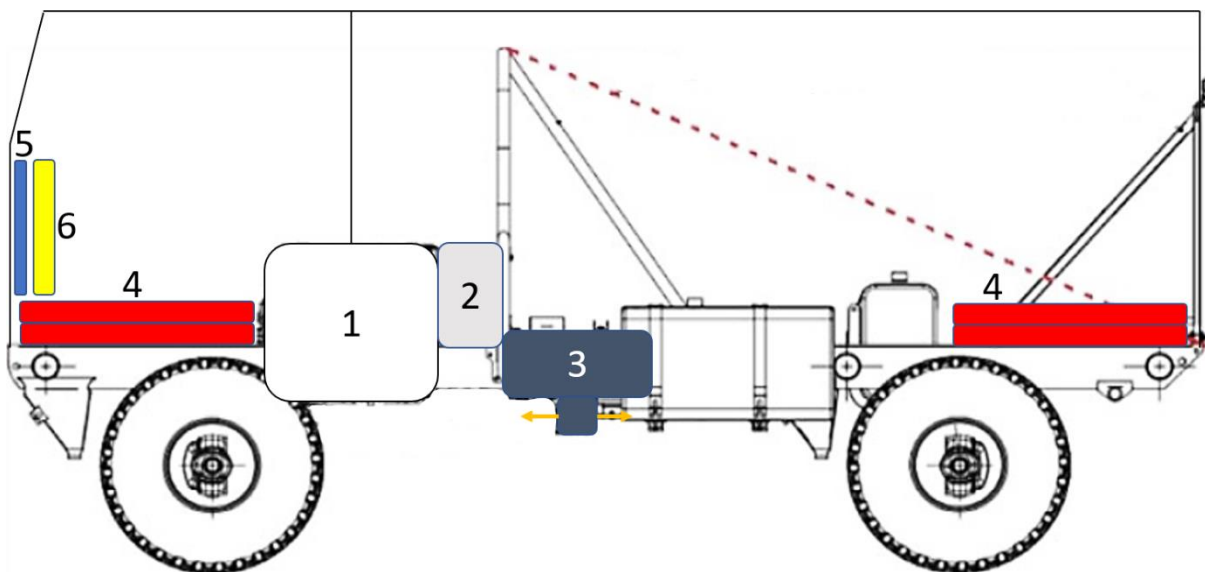
5.2 ZÁSTAVBA KOMPONENT

Ukázka ideového návrhu rozmístění komponent je zaznačena blokově. Velikost bloků je volena tak, aby v měřítku přibližně odpovídala skutečnosti. Sestava RIMAC AXL_1800 je umístěna podélně, jeden výstup směrem dopředu (pohon přední nápravy), druhý směrem dozadu (pohon zadní nápravy). Rozměry sestavy jsou patrné z obrázku 20.



Obr. 20: Rozměry sestavy RIMAC AXL 1800 [56]

Vzhledem k tomu, že akumulátory, generátor, elektromotory i elektronika jsou kapalinou chlazené, mohou být umístěny prakticky libovolně, pokud takové umístění výrazně neovlivní těžiště. Je však potřeba umístit jejich chladič na místo s dostatkem náporového vzduchu. Akumulátory musí být uchyceny pružně, například přes měkké pryžové silentbloky. To je dáno jejich velkou plochou ve spojení s rizikem pružné deformace rámu krutem během závodu.



Obr. 21: Ideový návrh rozmístění komponent, původní obrázek [20, s.3], upraven

Čísla zaznačená v obrázku reprezentují:

1. prodlužovač dojezdu – Iveco Cursor 8,
2. jednostupňová převodovka a dvakrát RIMAC SPM_900 v zapojení jako generátor,
3. sestava RIMAC AXL_1800, oranžové šipky značí vývody na kloubové hřídele,
4. akumulátory Lithos Energy LHV-8FP-700, dva vepředu, dva vzadu,
5. chladič nízkoteplotního chladicího okruhu (elektromotory, akumulátory, elektronika)
6. chladič vysokoteplotního chladicího okruhu (prodlužovač dojezdu).

Návrh je tvořen pro kamion s tuhými nápravami. V případě realizace u kamionu s koncepcí Tatra by bylo vhodnější pro pohon nepoužívat sestavu RIMAC AXL_1800, ale použít přímo motory SPM_900 a umístit je do centrální nosné roury. Převodovky by mohly být nahrazeny jednostupňovými planetovými, umístěnými taktéž v centrální nosné rouře. Elektronika by byla umístěna mimo centrální nosnou rouru.

5.3 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ

Výkonové a hmotnostní parametry navržené koncepce jsou srovnány s kamionem Kamaz 435091. Ten používá motor DCEC ISZ-13 o výkonu 770 kW, viz kapitola 2.1. Navržená koncepce má kombinovaný jmenovitý výkon 710 kW, tedy mírně nižší. Avšak krátkodobě je schopna dosáhnout výkonu až 900 kW, což je výkon, který motor ISZ-13 nezvládne dodat. Navržená koncepce je navíc schopna rozdělovat výkon mezi obě nápravy v libovolném poměru, což může být velkou výhodou.

Suchá hmotnost kamionu Kamaz je 8 600 kg a bude brána jako referenční hodnota pro orientační výpočet hmotnosti navržené koncepce [10]. Vzniklé hmotnostní rozdíly:

- menší a lehčí spalovací motor: -514 kg,
- absence převodovky: přibližně -290 kg [58],
- absence rozdělovací převodovky: přibližně -300 kg [23],
- převodovka mezi spalovacím motorem a generátory: přibližně +50 kg,
- elektromotory v režimu generátoru: +96 kg,
- řídicí elektronika generátorů: přibližně +84 kg,
- pohon RIMAC AXL_1800: +190 kg,
- akumulátory: +648 kg,
- nízkoteplotní chladicí okruh: uvažováno +30 kg (suchá hmotnost).

V součtu vychází navržená koncepce zhruba o 6 kg lehčí než Kamaz 435091, což je naprosto zanedbatelná hodnota. Při naplnění provozních kapalin se rozdíl velmi minimálně změní ve prospěch vozu Kamaz, neboť navržený koncept má o jeden chladicí okruh více. Lze tedy říci, že hmotnostně mezi vozy není významný rozdíl.

V neprospěch navržené koncepce navíc vstupuje akumulátor s nízkou energetickou hustotou. V případě, že by byly použity zakázkové akumulátory o vysoké energetické hustotě, mohlo by dojít k další hmotnostní úspoře, přibližně 200 kg.

Přesné porovnání produkovaných emisí nelze ze současných dat určit, bylo by třeba jej provést laboratorně.

Tab. 2: Shrnutí porovnání parametrů

	Kamaz 435091	Navržená koncepce
Výkon	770 kW (maximální)	710 kW (jmenovitý)
		900 kW (maximální)
Suchá hmotnost	8600 kg	8594 kg
Potřebné energie dodáno v elektrické energii	0 %	2,94 %
Rozdělení výkonu mezi nápravy v libovolném poměru	Ne	Ano (do max 50 % výkonu)

ZÁVĚR

I přes současné snahy prosazovat nízkoemisní vozy v soutěži Rallye Dakar je zřejmé, že realizace je velmi náročná a vyžaduje komplexní pochopení toho, jak vozidlo funguje. Z tohoto důvodu je součástí práce shrnutí technických parametrů a konstrukčních řešení současných závodních kamionů, které poskytuje základní přehled o konstrukci vozidla a faktorech, které limitují zástavbu komponent pro nízkoemisní pohon. Mezi ty patří zejména možnosti zástavby s ohledem na dostupný prostor a ovlivnění polohy těžiště vozidla, nebo hmotnost komponent. Další důležitou částí práce je přehled současných nízkoemisních a hybridních konceptů na Rallye Dakar, který taktéž poukazuje na problémy, jež se u nich vyskytují.

Hlavním cílem práce však bylo zanalyzovat energetické nároky na jednu etapu závodu u současných závodních kamionů a navrhnout elektrickou nebo hybridní alternativu. V části zaměřené na analýzu energetických nároků bylo zjištěno, že bateriový elektrický pohon nemůže být použit z důvodu vysoké hmotnosti. Elektrický pohon s vodíkovým článkem taktéž nemůže být použit, neboť palivové nádrže zabírají příliš mnoho místa a na vozidle není možné vhodné umístění. Jedinou koncepcí, která byla vyhovující, je elektrický pohon s prodlužovačem dojezdu, pro který byly navrženy parametry komponent. Výstupem této části je výpočetní sešit pro software Microsoft Excel, který po importování jízdních dat provede výpočet spotřebované energie a lze pomocí něj ověřit správnost navržených parametrů komponent. Ve výpočetním sešitu lze názorně vidět, jak jsou parametry komponent vzájemně ovlivňovány a jak například drobná změna výkonu prodlužovače dojezdu výrazně ovlivní potřebnou kapacitu akumulátoru. Je tedy třeba vzít v úvahu, že v rámci volby parametrů komponent existuje více možných řešení a tato práce reprezentuje pouze jedno z nich.

V poslední části práce byl proveden výběr konkrétních komponent dle navržených parametrů, přičemž komponenty byly voleny z těch, které jsou nabízené a dostupné ke koupi.

Výsledkem je navržená koncepce, která by měla být svými výkonovými a hmotnostními parametry vůči současným závodním kamionům plně konkurenceschopná. Přesnou emisní úsporu nelze z dostupných dat zjistit, bylo by třeba ji určit laboratorně. A otázkou k zamyšlení je, jestli je vůbec třeba ji zjišťovat. Z globálního hlediska jsou totiž emise vozidel na Rallye Dakar naprosto zanedbatelné a ve snaze o zavádění nízkoemisních konceptů tak lze spatřit spíše snahu o popularizaci těchto koncepcí v očích diváků z řad široké veřejnosti. Diváka, který by při koupi auta o hybridním voze ani neuvažoval pak může přesvědčit, když uvidí skvěle fungující hybridy na Dakaru. A pokud bude tímto způsobem osloveno větší množství lidí, může se jednat o výraznou podporu nízkoemisní mobility.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Categories. *Official website of the Dakar Rally* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, [2021] [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.dakar.com/en/dakar-world/categories>
- [2] *Historic book* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, 2021, 278 s. [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: https://storage-aso.lequipe.fr/ASO/motorSports_dak/DAK21-GuideHistorique-UK.pdf
- [3] Dakar 2022: Dakarská pohroma pro Čechy. Loprais končí, Prokop nabral obří ztrátu. Tůma je čtvrtý. *Sport.cz* [online]. Praha: BORGIS, [2022], 12. ledna 2022 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://www.sport.cz/clanek/moto-rallye-dakarska-pohroma-pro-cechy-loprais-konci-prokop-nabral-obri-ztratu-tuma-je-ctvrty-3048790>
- [4] Typical Day. *Official website of the Dakar Rally* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, [2021] [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://www.dakar.com/en/espace-ccr/typical-day>
- [5] *Dokumentace 2016: Documentation 2016*. Praha: Power Sports Enterprises, 2016, 200 s.
- [6] The Route of Dakar 2022. *Official website of the Dakar Rally* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, [2021] [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.dakar.com/en/overall-route>
- [7] Dakar 2020 course preview: Check out the route. *Red Bull* [online]. Wals bei Salzburg: Red Bull Media House, 22. 12. 2019 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: <https://www.redbull.com/int-en/dakar-2020-course-overview>
- [8] TATRA. *BUGGYRA Racing* [online]. Roudnice n.L: BUGGYRA ORGANISATION, [2021] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.buggyra.com/cs/racing/tatra>
- [9] *REGLEMENT TECHNIQUE / TECHNICAL REGULATIONS* [online]. Paris: Fédération Internationale de l'Automobile, 2021 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/reglement_aso_auto_2021_0.pdf
- [10] Автомобиль КАМАЗ-435091. *KAMAZ MASTER* [online]. Naberezhnye Chelny: KAMAZ-master sport team, [2021] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://kamazmaster.ru/team/trucks/kamaz-435091>
- [11] 2020 Dakar Rally: Kamaz 43509 race truck profile. *Red Bull* [online]. Wals bei Salzburg: Red Bull Media House, 27. 12. 2019 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.redbull.com/int-en/kamaz-truck-dakar-vehicle-profile>
- [12] *IVECO Powerstar* [online]. Turin: IVECO, [2021] [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.iveco.com/Documents/Dakar/docs/IVECO-Powerstar.pdf>
- [13] DCEC ISZ525-40 Automotive Engine. *DCEC* [online]. Shenzhen: DCEC, c2021 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.dcec-engine.com/dcec-isz525-40-engine/>

- [14] TATRA Phoenix Dakar 4x4. *Talosa s.r.o.* [online]. Kopřivnice: Talosa [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.talosa.info/cz/specialni-vozidla/tatra-phoenix/>
- [15] Karel: Vítěz 3 etap Dakaru 2021. *Big Shock! Racing* [online]. Praha: MM Production, c2023-2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.bigshockracing.cz/prodej-a-pronajem/karel/>
- [16] *HOMOLOGATION FORM IN ACCORDANCE WITH APPENDIX J OF THE INTERNATIONAL SPORTING CODE: T4-4048* [online]. Paris: Fédération Internationale de l'Automobile, 2002 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://historicdb.fia.com/sites/default/files/car_attachment/1601074201/homologation_form_number_4048_group_t4.pdf
- [17] *HOMOLOGATION FORM IN ACCORDANCE WITH APPENDIX J OF THE INTERNATIONAL SPORTING CODE: T4-4051* [online]. Paris: Fédération Internationale de l'Automobile, 2002 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://historicdb.fia.com/sites/default/files/car_attachment/1601074201/homologation_form_number_4051_group_t4.pdf
- [18] *HOMOLOGATION FORM IN ACCORDANCE WITH APPENDIX J OF THE INTERNATIONAL SPORTING CODE: T4-4056* [online]. Paris: Fédération Internationale de l'Automobile, 2003 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://historicdb.fia.com/sites/default/files/car_attachment/1601073901/homologation_form_number_4056_group_t4.pdf
- [19] VLK, František. *Stavba motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003, 499 s. ISBN 80-238-8757-2.
- [20] *2022 ANNEXE J / APPENDIX J – ARTICLE 287: Réglementation spécifique aux Camions Tout-Terrain Prototypes (Groupe T5)* [online]. Paris: Fédération Internationale de l'Automobile, 2021 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/287_2022_wmsc_2021.12.15.pdf
- [21] Tatrovácká koncepce. *Tatra* [online]. Kopřivnice: TATRA TRUCKS [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.tatra.cz/proc-tatru/technicka-koncepce-tatra/tatrovacka-koncepce/>
- [22] Staying cool: Complex cooling systems for the Dakar Rally in the Audi RS Q e-tron. *Audi MediaCenter* [online]. Ingolstadt: AUDI, 2021, 12/14/21 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/staying-cool-complex-cooling-systems-for-the-dakar-rally-in-the-audi-rs-q-e-tron-14439>
- [23] *PRODUKTÜBERSICHT: ALLRAD-SYSTEME FÜR LKWs* [online]. Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://www.zf.com/products/media/en/pim/ib___marine___special_driveline_technology/no_product_group_2/Product_Datasheets_All-Wheel_de_en_pdf.pdf
- [24] How do air brakes work? *Universal Technical Institute* [online]. Phoenix: Universal Technical Institute, Jul 2, 2020 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.uti.edu/blog/diesel/air-brakes>

- [25] Air tanks. *Michigan Truck Spring* [online]. Saginaw: Michigan Truck Spring of Saginaw, c2022 [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://www.truckspring.com/heavy-duty-truck-parts/brake-and-wheel-parts/air-tanks.aspx>
- [26] What's new. *Official website of the Dakar Rally* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, [2021] [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.dakar.com/en/dakar-world/whats-new>
- [27] 2022 Dakar: the call of the Desert. *Official website of the Dakar Rally* [online]. Boulogne Billancourt: Amaury Sport Organisation, [2021] [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://www.dakar.com/en/news/2021/2022-dakar-the-call-of-the-desert/172128>
- [28] *Audi at the Dakar Rally* [online]. Ingolstadt: AUDI, 2021 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: https://audimediacycenter-a.akamaihd.net/system/production/uploaded_files/20336/file/5daab3963c2bf39cbe0bc3193b02f95012dc5a80/211201_Basisinfo_Rallye_Dakar_GB.pdf?1640114594
- [29] RS Q e-tron. *Audi.com* [online]. Ingolstadt: AUDI, [2021] [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.audi.com/en/company/audi-sport/audi-racing-models/rs-q-e-tron.html>
- [30] Lightweight, efficient, powerful: the new Audi turbo engine for the DTM. *Audi MediaCenter* [online]. Ingolstadt: AUDI, c2022, 03/20/19 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/lightweight-efficient-powerful-the-new-audi-turbo-engine-for-the-dtm-11412>
- [31] *Technical data: Audi RS 5 DTM (2019)* [online]. Ingolstadt: AUDI, 2019 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://audimediacycenter-a.akamaihd.net/system/production/uploaded_files/14222/file/6aa48cd58b04f2d188d63b57527fa808a71e8dc8/190426_Technische_Daten_Audi_RS_5_DTM_2019_GB.pdf?1556266341
- [32] Rallye Dakar: The high-voltage battery in the Audi RS Q e-tron. *Audi MediaCenter* [online]. Ingolstadt: AUDI, c2022, 12/21/21 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/rallye-dakarthe-high-voltage-battery-in-the-audi-rs-q-e-tron-14453>
- [33] Formula E: The Audi MGU05 in the e-tron FE07. *Audi MediaCenter* [online]. Ingolstadt: AUDI, c2022, 11/26/20 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/audimediacytv/video/formula-e-the-audi-mgu05-in-the-e-tron-fe07-5332>
- [34] With expertise and passion to the finish line: The 2022 Dakar Rally. *Audi.com* [online]. Ingolstadt: AUDI, 02/03/2022 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.progress.audi/progress/en/rally-dakar-2022.html>
- [35] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2006, 376 s. ISBN 80-239-6461-5.
- [36] What is the link between the CO2 emissions and fuel consumption of my car?. *WTLF facts* [online]. Brussels: ACEA [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.wtlffacts.eu/link-between-co2-emissions-fuel-consumption/>

- [37] Technologie. *MKR Adventure* [online]. Nové Dvory: MKR TECHNOLOGY, [2021] [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <http://mkr-adventure.com/technologie-1/>
- [38] World first! Riwald Dakar Team to Dakar with hybrid truck. *MKR Adventure* [online]. Nové Dvory: MKR TECHNOLOGY, 27.9.2019 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <http://mkr-adventure.com/en/news-1/world-first-riwald-dakar-team-to-dakar-with-hybrid-truck.html>
- [39] První hybridní kamion na Dakar vyšle Renault. Postavili ho v Česku. *Aktuálně.cz* [online]. Praha: Economia, c1999–2022, 16.10.2019 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://sport.aktualne.cz/motorismus/dakar/mkr-technology-rallye-dakar-2020-renault/r~aae48ce8f02e11e9858fac1f6b220ee8/>
- [40] Impact of Different Hybrid-Electric Architectures on CO2 and NOX Emissions of a Diesel-Powered LCV: a Simulation Study. *Garrett Motion* [online]. Rolle: Garrett Motion, c2022, April 2021 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/news/technical-paper/impact-of-different-hybrid-electric-architectures-on-co2-and-nox-emissions-of-a-diesel-powered-lcv/>
- [41] *Press relase* [online]. Héricourt: Gaussin, 2021 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: https://assets-global.website-files.com/603ce43d5074b84572323408/618aa569631c8fd16d79f015_CP%20H2%20racing%20truck%20and%20truck%20range%20VE%20VDEF.pdf
- [42] Gaussin – Hydrogen and Electric Transport for Cargo at Ports, Logistics Centers and Airports. *Hydrogen Central* [online]. Amsterdam: Hydrogen Central, c2022, January 14, 2022 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://hydrogen-central.com/gaussin-hydrogen-electric-transport-cargo-ports-logistics-airports/>
- [43] O'HAYRE, Ryan, Suk-Won CHA, Whitney COLELLA a Fritz B PRINZ. *Fuel Cell Fundamentals* [online]. Somerset: John Wiley, 2016 [cit. 2022-02-25]. ISBN 9781119114208. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=O2JYCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=fuel+cell&ots=RRBPWSP3re&sig=Cc6g881NJ59I2_8QPkvnhfPKhw&redir_esc=y#v=onepage&q=fuel%20cell&f=false
- [44] Na Dakar se už chystá elektrický závodní kamion. Celý vznikne v Česku. *Automix.cz* [online]. Praha: VLTAVA LABE MEDIA, 9.2.2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://automix.denik.cz/magazin/na-dakar-se-uz-chysta-elektricky-zavodni-kamion-cely-vznikne-v-cesku-20210209.html>
- [45] What is a lithium-ion battery and how does it work? *University of Washington: Clean energy institute* [online]. Seattle: University of Washington, c2020 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>
- [46] Základní informace k vodíku. *HYTEP: Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec: Česká vodíková technologická platforma, c2022 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>

- [47] *Hydrogen Type 4 cylinders* [online]. Ålesund: Hexagon Purus, [2022] [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/hexagonpurus-website/Type4_Datasheet.pdf
- [48] Li-ion Voltage Analysis. *Silicon Lightworks* [online]. Pompano Beach: Silicon Lightworks, c2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://siliconlightworks.com/li-ion-voltage>
- [49] SVÍDA, David, odborný asistent ÚADI OPJ [ústní sdělení]. Brno, 27.4.2022
- [50] Cursor 13. *IVECO* [online]. Vysoké Mýto: IVECO Czech Republic [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.iveco.com/czech/produkty/pages/trakker_hnaci_ustroji_cursor13.aspx
- [51] Cursor 13. *FPT Powertrain Technologies* [online]. Turin: FPT Industrial [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.fptindustrial.com/global/en/engines/on-road/trucks/cursor13>
- [52] Cursor 8. *IVECO* [online]. Vysoké Mýto: IVECO Czech Republic [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.iveco.com/czech/produkty/pages/stralis_hnaci_ustroji_cursor8.aspx
- [53] *Lithos High Voltage Battery Packs* [online]. San Rafael: Lithos Energy, c2019 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.lithosenergy.com/uploads/1/2/1/6/121687396/lithos_high_voltage_brochure_fin.pdf
- [54] *SPM_900* [online]. Sveta Nedelja: Rimac Technology, 2020 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: http://www.rimac-technology.com/media/qqlj3vqx/spm_900.pdf
- [55] *INV_1000* [online]. Sveta Nedelja: Rimac Technology, 2020 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: http://www.rimac-technology.com/media/0c2gjrd0/inv_1000.pdf
- [56] *AXL_1800* [online]. Sveta Nedelja: Rimac Technology, 2020 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: http://www.rimac-technology.com/media/o4phigdj/axl_1800.pdf
- [57] SVÍDA, David. Převodové poměry [elektronická pošta]. Message to: 209030@vutbr.cz. 1. května 2022 13:56 [cit. 2022-05-03]. Osobní komunikace.
- [58] *PRODUKTÜBERSICHT: Lkw- und Van-Antriebsstechnik* [online]. Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://www.zf.com/products/media/en/pim/tt__truck__van_driveline_technology/driveline_1/TT_Product_Overview_202204_DE_EN_lowres_opt.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ASO	Amaury Sport Organisation	Organizátor Rallye Dakar
BEV	Battery-powered Electric Vehicle	Bateriové elektrické vozidlo
CSV	Comma separated values	Čárkou oddělený datový soubor
DCEC	Dongfeng Cummins Engine Co.	Výrobce motorů
DTM	Deutsche Tourenwagen Masters	Německé mistrovství cestovních vozů
EREV	Extended Range Electric Vehicle	Vozidlo s prodlužovačem dojezdu
FCEV	Fuel-cell Electric Vehicle	Elektrické vozidlo s palivovým článkem
FIA	Fédération Internationale de l'Automobile	Mezinárodní automobilová federace
HVBS	High Voltage Battery System	Vysokonapěťový bateriový systém
Li-ion	Lithium-ion	Lithium-iontový typ akumulátoru
MGU	Motor-generator unit	Jednotka motor-generátor

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

C_a	(kWh)	Okamžitá hodnota energie v akumulátoru
C_d	(kWh)	Nejnižší dovolený stav nabití akumulátoru
C_n	(kWh)	Navrhovaná minimální kapacita akumulátoru
D_{nH_2}	(m)	Průměr nádrže na vodík
E_{aA}	(kWh)	Energie v plně nabitém akumulátoru vozu Audi
$E_{aA(\%)}$	(%)	Procentuální vyjádření energie akumulátoru vůči celkové energii u Audi
E_{aG}	(kWh)	Energie v plně nabitém akumulátoru kamionu Gaussin
E_{ak}	(kWh)	Energie uložená v akumulátoru
E_{akd}	(kWh)	Rozdíl mezi skutečnou uloženou a odebranou energií z akumulátoru
$E_{b(kWh)}$	(kWh)	Množství energie v 1 litru benzínu
E_{bA}	(kWh)	Energie benzínu v plně natankovaných palivových nádržích Audi
E_c	(kWh)	Celková energie potřebná k absolvování závodní etapy č. 6
E_{cA}	(kWh)	Celková energie uložená ve voze Audi
E_{cp}	(kWh)	Celková energie potřebná k absolvování etapy o délce 550 km
E_{dif}	(kWh)	Odebraná (-) a dodaná (+) energie z akumulátoru
E_{dob}	(kWh)	Skutečná uložená energie do akumulátoru během závodní etapy č. 6
E_{dobt}	(kWh)	Teoretická uložená energie do akumulátoru během závodní etapy č. 6
$E_{el(\%)}$	(%)	Procentuální vyjádření spotřebované elektrické energie ze sítě
E_{H_2}	(kWh)	Energie uložená v 1 kg vodíku
E_{od}	(kWh)	Energie odebraná z akumulátoru během závodní etapy č. 6
E_s	(kWh)	Energie potřebná k dodání výkonu P_{Ed} za čas t_k
E_z	(kWh)	Okamžitá energie, která již nelze uložit do akumulátoru
E_{zc}	(kWh)	Celková energie, kterou již nelze uložit do akumulátoru
f	(Hz)	Frekvence měření jízdních dat
i_{10}	(-)	Převodový poměr u kamionu se spalovacím motorem při rozjezdu
i_n	(-)	Skutečný počet nádrží na vodík
i_{nt}	(-)	Teoretický potřebný počet nádrží na vodík
i_p	(-)	Převodový poměr v převodovce sestavy AXL_1800
i_{red}	(-)	Převodový poměr redukčních převodů v nábojích kol
i_{roz}	(-)	Maximální převodový poměr stálého převodu v rozvodkách
l_{nH_2}	(m)	Délka nádrže na vodík
m_{cH_2}	(kg)	Celková hmotnost vodíku a nádrží

M_{em}	(N·m)	Točivý moment jednoho elektromotoru v sestavě AXL_1800
m_{H2}	(kg)	Potřebná hmotnost vodíku k absolvování etapy o délce 550 km
M_{kk}	(N·m)	Točivý moment na kole při rozjezdu navržené koncepce
M_{ksm}	(N·m)	Točivý moment na kole při rozjezdu kamionu se spalovacím motorem
m_n	(kg)	Kapacita vodíku jedné nádrže
m_{pal}	(kg)	Potřebné minimální hmotnostní množství paliva k etapě č. 6
m_{pe}	(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	Měrná efektivní spotřeba paliva vznětového prodlužovače dojezdu
M_{sm}	(N·m)	Točivý moment motoru u kamionu se spalovacím motorem
n	(-)	Počet naměřených hodnot v jízdách datech po úpravě
n_{kol}	(min ⁻¹)	Otáčky kol při maximální rychlosti
n_t	(min ⁻¹)	Výstupní otáčky z převodovky sestavy RIMAC
P_{0A}	(kW)	Společný příkon obou pohonných jednotek vozu Audi
P_{0G}	(kW)	Společný příkon obou pohonných jednotek u kamionu Gaussin
P_{dA}	(kW)	Dobíjecí výkon generátoru Audi
P_{dG}	(kW)	Dobíjecí výkon palivového článku u kamionu Gaussin
P_{EA}	(kW)	Efektivní výkon spalovacího motoru u vozu Audi
P_{ed}	(kW)	Efektivní výkon kamionu, ze kterého pochází naměřená data
P_{en}	(kW)	Navržený výkon spalovacího motoru pro pohon generátoru
P_{mA}	(kW)	Společný výkon obou pohonných jednotek vozu Audi
P_{mG}	(kW)	Společný výkon obou pohonných jednotek u kamionu Gaussin
P_{rA}	(kW)	Rozdíl mezi dodávaným a odebíraným výkonem z akumulátoru Audi
P_{rG}	(kW)	Rozdíl mezi dodávaným a odebíraným výkonem z akumulátoru Gaussin
r_{pneu}	(m)	Statický poloměr pneumatiky
s_{e6}	(km)	Délka etapy č. 6 z Rallye Dakar 2022
s_{ec}	(km)	Celková délka etapy
s_{em}	(km)	Délka měřeného úseku
s_{ep}	(km)	Minimální požadovaný dojezd 550 km
t_k	(s)	Doba působení jedné naměřené hodnoty při frekvenci 20 Hz
t_{vA}	(h)	Čas do úplného vybití akumulátoru u vozu Audi
t_{vG}	(h)	Čas do úplného vybití akumulátoru u kamionu Gaussin
v_{max}	(kmh ⁻¹)	Maximální rychlost závodních kamionů určená omezením
V_{nH2}	(m ³)	Objem zabíraný nádržemi na vodík
V_{pal}	(l)	Minimální potřebná kapacita palivových nádrží k etapě č. 6

η_{FC}	(-)	Účinnost palivového článku
η_{MGUA}	(-)	Účinnost jedné jednotky MGU u vozu Audi
ρ_b	($\text{kg}\cdot\text{m}^3$)	Hustota benzínu
ρ_n	($\text{kg}\cdot\text{m}^3$)	Hustota motorové nafty



SEZNAM PŘÍLOH

P1: Analyza_209030.xlsb