



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

VÝVOJ VELOMOBILŮ

DEVELOPMENT OF VELOMOBILE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Silvestr Adámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Silvestr Adámek**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, 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:

Vývoj velomobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velomobily se stávají více populárním dopravním prostředkem. Spolu se zvyšujícím se zájmem je kladen větší důraz na jejich konstrukci z pohledu komfortu, rychlosti pohybu či využití elektromotoru pro překonání větších vzdáleností. Při jejich vývoji jsou využívány moderní přístupy.

Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše v oblasti velomobilů.
Rozdělení velomobilů.
Konstrukce velomobilů.
Popis vybraných přístupů využívaných při vývoji velomobilů.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, CH.R., BUDYNAS, R.G. Konstruování strojních součástí. VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

SMITH, J.D. Gear noise and vibration. New York: Marcel Dekker, INC. 1999. 186 s. ISBN 0-8247-6005-0.

SHENG, Gang, Vehicle noise, vibration, and sound quality, Warrendale, Pa.: SAE International, c2012, xi, 492 p. ISBN 978-076-8034-844.

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 vývojem velomobilů s cílem poskytnutí komplexního přehledu o těchto moderních, avšak méně rozšířených dopravních prostředcích. Velomobily představují vozidla s aerodynamickou karoserií, která jsou poháněna primárně lidskou silou. Vzhledem k absenci pohonu na bázi spalovacích motorů snižují nejen negativní dopady na životní prostředí, ale i závislost na fosilních palivech. V této práci je analyzována oblast rozdělení velomobilů na základě různých kritérií. Jedná se například o konfiguraci kol, druh pohonu nebo kategorizace jejich využití. Kromě toho je proveden rozbor klíčových konstrukčních prvků a materiálů, které jsou při výrobě běžně využívány a stále i v průběhu technologického pokroku inovovány. Kupříkladu moderní materiály jako uhlíková vlákna poskytují výrazné zvýšení pevnosti na úkor redukce celkové hmotnosti velomobilu. Vývoj těchto novodobých vozidel je závislý na využití moderních přístupů. Konkrétně lze v tomto kontextu hovořit o oblastech, jako je optimalizace aerodynamických vlastností karoserie, pevnost konstrukce, či otázky týkající se elektrického pohonu. Velomobily sice představují efektivní a ekologický způsob dopravy, vyšší pořizovací náklady, hmotnost a objemnost konstrukce mohou však představovat problém pro širší přijetí společností.

KLÍČOVÁ SLOVA

Velomobil, lehokolo, vozidlo poháněné lidskou silou, aerodynamika

ABSTRACT

The bachelor thesis deal with one of a lesser-known means of transport as velomobile certainly is at the moment. This research aims to the development and overall complexity of these modern human-powered vehicles using aerodynamics to its advantage. Due to absence of internal combustion engine, velomobiles reduce negative environmental impacts but also dependence of fossil fuels. Different specifications of velomobiles such as wheels configuration, propulsion system and its usage are being analysed in this study as well as main construction elements or invariably innovated materials. For instance, carbon fibres are one of the modern materials contributing to the strength and lightness of velomobile. Modern approaches goes hand in hand with the development of these modern vehicles, aerodynamics optimizations of the vehicle body, construction strength or questions regarding electric propulsion to be more specific. Although velomobiles represent an efficient way of transportation, initial costs, weight and size could be impediment to the wider public.

KEYWORDS

Velomobile, recumbent bike, human powered vehicle, aerodynamics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ADÁMEK, Silvestr. *Vývoj velomobilů*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Kamil Řehák. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157889>



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. května 2024

.....

Silvestr Adámek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval společnosti Katanga s.r.o. za poskytnutí informací o normách. V poslední řadě chci poděkovat své rodině a přátelům za velkou podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	10
1 Velomobil	11
1.1 Konfigurace kol	11
1.2 Konstrukce karoserie	14
1.3 Pohon	15
1.4 Oblasti využití velomobilu	17
2 Konstrukce velomobilu	19
2.1 Karoserie.....	19
2.2 Elektrický pohon	22
2.3 Baterie.....	25
2.4 Převodové mechanismy	25
2.5 Řízení.....	27
2.6 Zavěšení kol.....	28
2.7 Brzdy	31
2.8 Kola	33
2.9 Sedadlo	34
2.10 Příslušenství.....	35
3 Normy popisující oblast využití velomobilu	36
4 Moderní metody při vývoji velomobilů	37
4.1 Aerodynamika	37
4.2 Využití metody konečných prvků	41
4.3 Multi-body simulace.....	43
4.4 Optimalizace elektromotoru	44
Diskuze	46
Závěr	47
Použité informační zdroje	49
Seznam použitých zkratk a symbolů	61

ÚVOD

Vědci a odborníci v současné době aktivně hledají komplexní řešení zmírnění dopadu celosvětových globálních problémů. Mezi ně patří především globální oteplování, nadměrná spotřeba fosilních paliv nebo znečišťování ovzduší, přičemž významnou roli zde hraje doprava.

Výfukové plyny motorových vozidel vytváří závažné ekologické a zároveň zdravotní problémy nejen v České republice, ale i v celém světě. Činností spalovacích motorů vznikají směsi chemických látek, které obsahují především prachové částice a oxidy dusíku. Zvýšená dopravní zátěž vytváří zácpy a zpomaluje pohyb vozidel. Zvyšuje tak množství emisí produkovaných automobily. Tyto emise mohou následně ovlivnit ovzduší ve městech, a to ve velkém rozsahu.

Z uvedených důvodů je kladen velký nátlak na automobilový průmysl, především při hledání udržitelných alternativ k tradičním automobilům. Existuje mnoho možností, jak zlepšit čistotu ovzduší a zmírnit i hustotu dopravního zatížení ve městech. Mezi ně patří například zatraktivnění městské dopravy zvýšením využívání jízdních kol, elektrokol nebo méně známých velomobilů. Velomobily představují zajímavou, ale v jistém ohledu omezenou náhradu běžných automobilů. Mohou být vybaveny elektromotorem, který přispívá ke zvýšení komfortu při zachování ekologičnosti mobility ve městech.

V dnešní době se často potýkáme se zdravotními problémy způsobenými nedostatkem pohybu, což dává důraz na nalezení možností, jak zlepšit životní styl. Využití velomobilu umožňuje pohyb a cvičení, čímž pomáháme nejen našemu fyzickému, ale také psychickému zdraví. Velomobil se tak stává efektivním a ekologickým dopravním prostředkem nejen v dopravě a zároveň zlepšuje i celkovou kvalitu života. Ve srovnání s jízdními koly mají velomobily menší odpor vzduchu díky aerodynamické karoserii, která může poskytovat i ochranu řidiče před nepříznivým počasím. Na druhou stranu vyšší pořizovací cena a zvýšená hmotnost konstrukce, oproti klasickým kolům, může velomobil znevýhodnit.

1 VELOMOBIL

Velomobily se v současné době stávají stále více populárními dopravními prostředky. Nabízí ekologickou možnost dopravy, která kombinuje benefity jízdního kola a pohodlí, či ochranu automobilu [1]. Pod názvem velomobil si můžeme představit aerodynamické vozidlo poháněné lidskou silou [2] nebo s podporou elektromotoru. Základem velomobilu je lehokolo s kapotáží, která obklopuje tělo jezdce [3]. Jezdec se nachází obvykle v pololežící poloze, což zvyšuje komfort při jízdě na delší vzdálenost. Tato poloha jezdce rovnoměrněji rozloží jeho váhu na větší plochu a snižuje tlak na ruce, zápěstí a spodní část zad. [4] Kapotáž velomobilu poskytuje oproti běžným kolům mnoho různých výhod, zejména zlepšení aerodynamiky vozidla, ochranu před povětrnostními vlivy a eliminuje závažnost zranění při nehodě [5]. Přestože je velomobil mnohem bezpečnější než jízdní kolo, není tak bezpečný jako automobil. Důvodem jsou materiály karoserie s nižší mírou pevnosti a nepřítomnost airbagů [6]. Díky zlepšené aerodynamice uzavřené karoserie vozidla jsou velomobily schopny dosáhnout rychlostí, kterých by běžné jízdní kolo nebo tříkolka nedokázaly v případě rovných úseků dosáhnout [5]. Kvůli minimální hmotnosti velomobilu, jeho zvýšeným aerodynamickým vlastnostem a pololežící poloze jezdce, je zapotřebí třikrát až čtyřikrát méně energie pro jeho pohon oproti klasickému kolu [7]. Příklad velomobilu se třemi koly je vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Tříkolový velomobil [57]

Přestože mají tato vozidla mnoho výhod, je jejich pořizovací cena poměrně vysoká. Nejsou totiž prostředkem velkovýroby, ale každý kus je vyráběn individuálně – na míru. Ve srovnání s jízdním kolem je cena velomobilu vyšší, avšak v porovnání s automobilem je takřka srovnatelná. Výhodou velomobilů je naopak jejich nezávislost na palivu, jako je tomu u automobilů. [7]

Velomobily můžeme rozčlenit do různých kategorií na základě mnoha hledisek. Prvním hlediskem je dělení podle uspořádání kol.

1.1 KONFIGURACE KOL

V současné době převažují velomobily ve tříkolových nebo čtyřkolových variantách. Existuje i méně dostupná dvoukolová varianta. S každým přidaným kolem však narůstá větší počet kontaktních bodů, což má teoreticky za následek zvýšený odpor valivým třením. [5]

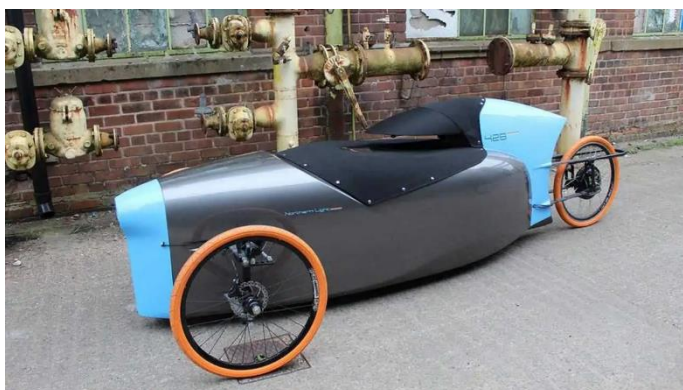
První zmíněnou a méně běžně využívanou variantou jsou **dvoukolové velomobily**. Ve srovnání s bezkapotovými tříkolovými vozidly jsou nekapotovaná jízdní kola výrazně kompaktnější. Jsou také výrazně lehčí z důvodu nepřítomnosti přidaného kola, případně odpružení, či jiných dodatečných prvků. Z pohledu karoserie velomobilu už takový rozdíl nenastává. Bez ohledu na to, zda se jedná o dvoukolové nebo tříkolové uspořádání, šířka karoserie zůstává téměř stejná. Vzhledem k navýšené celkové hmotnosti přidáním karoserie, je relativní rozdíl hmotností mezi dvoukolovou a tříkolovou variantou výrazně menší. Dalším důvodem, proč se dvoukolové velomobily méně využívají, je jejich horší stabilita. Ta je snížena kvůli větší boční ploše, o kterou se vítr opírá během jízdy. Kromě toho je vozidlo také méně stabilní, například při zastavení, kdy je nutné postavit nohy na zem. [8] Na Obr. 2 je vyobrazen příklad dvoukolového elektrického velomobilu Elektrom.



Obr. 2 Dvoukolový velomobil Elektrom [72]

Tříkolové velomobily přinášejí zvýšenou stabilitu vozidla a sníženou citlivost na boční vítr, což je způsobeno jejich širší konstrukcí ve srovnání s dvoukolovými velomobily. Tříkolové velomobily přinášejí také určité nevýhody, mezi které patří zvýšení celkové hmotnosti a větší rozměr karoserie. Tyto velomobily se dále dělí do dvou základních skupin na tzv. Tadpole a Delta varianty. [8]

V dnešní době je **Tadpole uspořádání** nejčastěji používanou variantou velomobilu [5]. Toto uspořádání má dvě kola vpředu a jedno kolo vzadu. Díky dvěma předním kolům je zlepšena stabilita vozidla při průjezdu v zatáčkách. To je zvláště výhodné při vyšších rychlostech. [9] Nízké těžiště daného typu rovněž přispívá k lepší stabilitě. Další možnou výhodou je rozložení hmotnosti v přední části velomobilu, což umožňuje lepší kontrolu nad řízením nebo také bržděním. [10] Lepší aerodynamika je dosažena pomocí postupně zužujícího se profilu od přední části vozidla, čímž se zabrání vzniku dlouhého prázdného prostoru za velobilem, který je charakteristický pro konfiguraci Delta. Tento prostor je vyplněn zadním kolem, tím dochází ke zlepšení celkové stability. [8] Když je potřeba lepší obratnosti na užších místech, může být nevýhodou větší poloměr otáčení v porovnání s modelem Delta [9]. Nevýhodou Tadpole konfigurace je složitější systém řízení spočívající v použití méně obvyklých prvků při konstrukci velomobilů [11]. Příklad Tadpole velomobilu je zobrazen na Obr. 3.



Obr. 3 Tadpole velomobil [114]

Delta uspořádání je charakterizováno jedním kolem vpředu a dvěma koly vzadu [10]. Největší předností této varianty je lepší manévrovatelnost, kdy přední kolo může zatáčet téměř o 90° [9]. V konfiguraci Delta je těžiště umístěno výše a za osou řízení, což má za následek sníženou stabilitu a omezenou kontrolu nad řízením [10]. Toto uspořádání kol přináší i jiné nevýhody, mezi které patří výraznější náchylnost k přetáčivosti velomobilu v zatáčkách a zvýšení silových brzdných účinků přenášených na přední kolo [12]. Z toho je patrné, že využití daného typu uspořádání kol je vhodné pro jízdu při nižší rychlosti a méně sportovního stylu [10]. Vozidlo musí být v přední části navrženo s ohledem na umístění řídicího kola, aby nedocházelo k interakci s pedály během zatáčení [13]. Na Obr. 4 je vyobrazen Delta velomobil.



Obr. 4 Delta velomobil [115]

Nezanedbatelným typem jsou rovněž **čtyřkolové velomobily**. Ty mají místo jednoho zadního kola, jak je tomu u tříkolových velomobilů, rovnou dvě zadní kola. Aby se zabránilo přílišnému vertikálnímu rozšíření karoserie, používají se zadní kola stejného průměru, jako ta přední. [8] Čtyřkolové velomobily nejsou zdaleka tak běžně používanou variantou. Jejich největší výhodou je větší stabilita a prostornější zavazadlový prostor. To s sebou přináší větší hmotnost a sníženou aerodynamiku vozidla z důvodu přidaného čtvrtého kola. [5] Na rozdíl od tříkolových velomobilů mají čtyřkolové velomobily jednu výhodu, a tou je možnost mít obě zadní kola poháněna, stejně jako je tomu i u Delta velomobilu. Tím dochází ke zlepšení trakce, která je dále posílena díky většimu zatížení zadní nápravy. V případě pohonu obou zadních kol je potřeba zajistit, aby v zatáčkách nedocházelo k prokluzu vnitřního kola. Toho lze dosáhnout například použitím diferenciálu. Tento prvek ale způsobuje, že zadní náprava

bude složitější a bude mít větší hmotnost, což může negativně ovlivnit jízdní vlastnosti vozidla. [8] Příklad čtyřkolového velomobilu je vidět na Obr. 5.



Obr. 5 Čtyřkolový velomobil [116]

1.2 KONSTRUKCE KAROSERIE

Dnešní velomobily se vyrábí ve dvou základních variantách v pohledu zakrytí karoserie. První variantou je plně uzavřená karoserie a druhou variantou je otevřená karoserie, kdy hlava řidiče vyčnívá z velomobilu. V případě **plně uzavřené karoserie** vozidla lze část karoserie otevřít a umožnit tak řidiči nastoupit a vystoupit. Největší výhodou plně uzavřené karoserie je především ochrana před nepříznivým počasím. Tento typ karoserie má ale i řadu nevýhod. Jeden z problémů souvisí s dobrou ventilací ve vozidle. Jelikož řidič při šlapání vykonává fyzickou práci, z těla se tak uvolňuje teplo do okolního prostoru vozidla. Většina tohoto tepla vychází z hlavy řidiče, což může způsobit zamlžení skla a zhoršení viditelnosti při jízdě. [7]



Obr. 6 Velomobil s plně uzavíratelnou karoserií [117]

Většina velomobilů řeší tento problém pomocí ventilačních otvorů či kanálů, které umožňují chlazení, a zároveň zabraňují přístupu vody. V letním horkém počasí nemusí být pro řidiče plně uzavřená kapotáž zcela výhodná, protože nárůst tepla ve vozidle může způsobit zhoršení jízdních podmínek pro jezdce, a tedy jeho nižší výkon oproti otevřenému typu karoserie [14]. Čelní sklo se může stát neprůhledným také kvůli dešti nebo sněžení.

Problém však řeší přidání stěračů do výbavy vozidla. Nevýhodou této varianty karoserie může být zhoršení sluchových vjemů jezdce a rozhledu z velomobilu [7]. Možné odklopení plně uzavíratelné karoserie lze pozorovat na Obr. 6.



Obr. 7 Velomobil s otevřenou karoserií [57]

Druhou, již zmíněnou variantou je **otevřená karoserie**, také nazývaná částečně otevřená karoserie. Tuto alternativu využívá velké množství běžně využívaných velomobilů, někdy i elektrických velomobilů. Příkladem je model WAW od společnosti Katanga. Řidiči z vozu vyčnívá pouze hlava, takže jeho tělo je do velké míry obklopeno kapotáží [15]. Díky tomu, že je hlava řidiče odhalena, tak se nabízí mnoho výhod. Mezi tyto výhody patří neomezený rozhled, lepší sluchové vnímání okolní dopravy, nebo též chlazení. Nevýhodou je pak potenciální odhalení nepříznivému počasí a horší aerodynamika vozidla [14]. Ve velomobilu je taktéž nutný ventilační systém, jako u plně uzavřené varianty, protože může opět docházet k hromadění tepla uvnitř skořepiny. V částečně otevřené karoserii je skrze otvor pro hlavu umožněn jezdcí nástup i výstup do vozidla, což může řidiči občas působit problém. [15] Pro tento typ karoserie se také nabízí možnost přídatného pěnového krytu kolem hlavy, který lze připevnit zevnitř vozidla a poskytnout tak zbytku těla ochranu před deštěm [8]. Na Obr. 7 lze vidět velomobil s otevřenou karoserií.

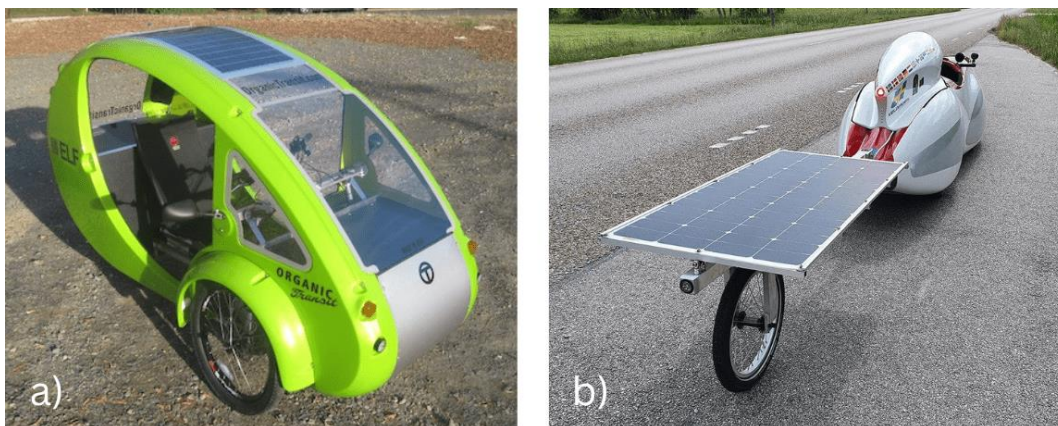
1.3 POHON

Nejběžnějším typem pohonu velomobilu je bezpochyby **lidská síla**. Při pohonu lidskou silou nedochází k tvorbě emisí. Jedinou emisí je zanedbatelné množství oxidu uhličitého, který vydechujeme při pohybu [16]. Šlapáním na šlapadlech se lidská síla přenáší na kola pomocí jednoduchého hnacího ústrojí. Součástí hnacího ústrojí bývá především řetěz, který je veden přes napínací kladky [8].

Dalším možným způsobem, jak lze pohánět velomobil, je pomocí **elektromotoru**. Elektricky asistované velomobily mají malý elektrický pohonný systém, napájený z baterie, který řidiči ulehčuje fyzickou námahu při šlapání. [14] Protože je velomobil těžší než normální jízdní kolo, tak zrychlení a stoupání do kopců vyžaduje mnohem větší úsilí. Velomobil spotřebuje při akceleraci zhruba dvakrát více energie než jízdní kolo, v závislosti na hmotnosti řidiče a vozidla. Pokud je tedy velomobil vybaven pomocným elektrickým

motorem, tak jsou tato negativa eliminována. [17] Nicméně právní předpisy v Evropské unii [8] stanovují, že elektromotor smí pomáhat pouze do maximální rychlosti 25 km/h. Použití elektromotoru v konstrukci velomobilu je taktéž dobrým přínosem pro jeho delší dojezd. Vzhledem k výrazně lepší aerodynamice velomobilů může být dojezd podobné elektrické asistenční jednotky a podobné baterie ve velomobilu asi o 50 % vyšší než ve srovnání se vzpřímenými koly nebo nekapotovanými lehokoly [14]. V případě potřeby je mnohem snazší zvýšit dojezd elektrického velomobilu než elektromobilu. Například model eWAW může být vybaven jednou či dvěma přídavnými bateriemi, což zvyšuje dojezd na 180 km s nepřetržitou asistencí motoru nebo 450 km, pokud je motor používán pouze k asistenci při akceleraci. [17] Většina elektricky asistovaných velomobilů využívá elektromotorů, které se nachází v náboji zadního kola, jako jsou nábojové motory s převodovkou nebo také nábojové motory s přímým pohonem. Jinou variantou mezi používanými motory jsou středové elektromotory. [14] Více k elektromotorům bude popsáno v kapitole o konstrukci velomobilů.

Dále se v současné době potýkáme s méně ekologicky přívětivými a k přírodě šetrnějšími zdroji, pomocí kterých získáváme elektřinu pro napájení baterií elektromotorů. Na řadu tedy přichází využití **solární energie**. [18] Solární energie patří mezi široce používaný obnovitelný zdroj. Sluneční energie je získávána pomocí střešních solárních panelů, a to k zásobování energie s pomocí elektrické sítě i nezávisle na ní. Narozdíl od elektráren poháněných uhlím nebo plynem, které souvisle dodávají elektřinu po celý den, jsou solární panely v dodávce energie přerušované. Je to ovlivněno umístěním panelů a změnami v denních a ročních cyklech. Aby byla zajištěn přísun konstantní elektrické energie, musí být fotovoltaika připojena k baterii. Fotovoltaika integrovaná ve vozidlech je považována za efektivní způsob dopravy. Tím, že jsou fotovoltaické panely namontovány na střechu velomobilu, chrání dodatečně řidiče před sluncem, prachem a chladem. Konfigurace poskytující především ochranu před sluncem lze použít jako střechu z plochých panelů, která minimalizuje dodatečný odpor větru.



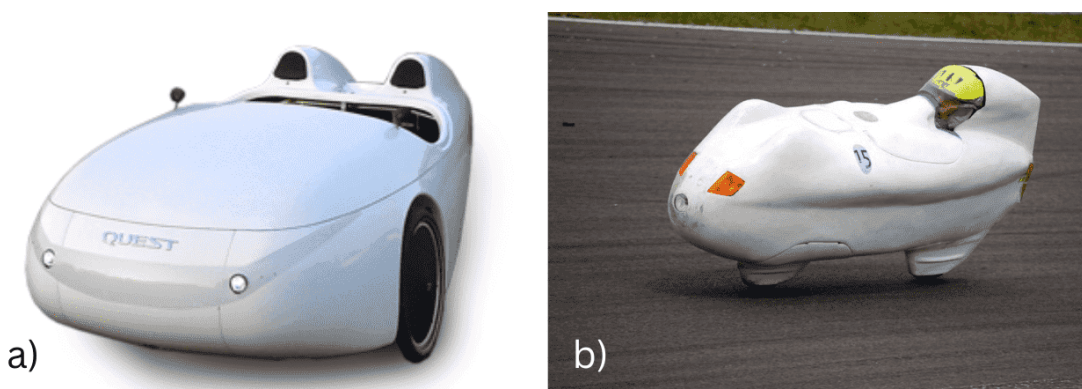
Obr. 8 a) Velomobil na solární pohon [118] b) Přívěs se solárním panelem [119]

Na Obr. 8 je představen el. velomobil na solární pohon. Další možnou alternativou, jak využít solární energii při cestování velobilem, je přívěs za něj připojený. Přívěsy jsou vybavené solárními panely, které napájí vozidlo a současně mohou být konstruovány tak, aby nesly i zavazadla, která s sebou jezdec veze. [19]

1.4 OBLASTI VYUŽITÍ VELOMOBILU

Velomobily mohou být navrhovány pro využití v mnoha různých sférách. Především jako vozidla na cestování, pro sportovní účely nebo také v průmyslu pro převoz hmotných materiálů. Dále je možné tato vozidla využívat jako dopravní prostředek **městské dopravy**.

Nepříznivé účinky současné dopravy při dojíždění na krátkou vzdálenost (jako např. emise skleníkových plynů nebo hluk) vedou k tomu, že společnost potřebuje udržitelné, praktické a také bezpečné řešení městské dopravy. Velomobily s elektrickou asistencí mohou tento problém vyřešit a snížit tak negativní dopady na životní prostředí a zdraví lidí [20]. Nynější elektrické velomobily využívané v městské dopravě se pohybují pomalejšími cestovními rychlostmi, kolem 25-35 km/h, díky které má řidič pohodlnější pocit z jízdy, umožňují také dostatečný přehled v dopravě. Některá vozidla jsou vybavena typem karoserie, který poskytuje uživateli ochranu před nepříznivými vlivy počasí pouze z přední a horní části. Řidiči je tak umožněn pohodlnější nástup a výstup do vozidla vzhledem k otevřeným bokům. [21] Díky kompaktnějším rozměrům tak nevyčnívají, jako například automobily, a umožňují snadnější pohyb v dopravě. Velomobily jsou vybaveny přídatnými prvky, jako například světlomety, směrovými a brzdovými světly, které vylepšují jejich viditelnost a interakci s okolními účastníky provozu. [22] Ve srovnání s automobily jsou velomobily lehčí a mají menší prostorovou stopu. To umožňuje výhodnější uskladnění a parkování na místech k tomu určených, jako je tomu u motorek, mopedů nebo jízdních kol [23].



Obr. 9 a) Dvoumístný velomobil [120] b) Streamliner [121]

Některé městské velomobily jsou konstruovány i jako dvoumístné vozy, které poskytují cestování pro dvě osoby sedící vedle sebe. Příkladem dvoumístného velomobilu je DuoQuest na Obr. 9. Oba řidiči mají své vlastní hnací zařízení, kterým každý přispívá k pohonu velomobilu. Může být také přizpůsoben pro dětskou sedačku, kterou lze umístit do zadní části vozidla. [24] Nevýhodou dvoumístných vozů je jejich větší hmotnost oproti jednomístným vozům. Mohou být i širší a jejich tvar upřednostňuje komfort před aerodynamickými vlastnostmi. [25]

Velomobily se mohou využívat i pro jiné účely než pouze v městské dopravě. Další možností je jejich **sportovní využití**. Mnoho cyklistických nadšenců využívá velomobily pro pocit z rychlé jízdy. Lepší pocit z jízdy jim umožňuje již zmíněná pohodlnější poloha sezení, díky níž se nekrčí a nebolí je záda, tak jako je tomu na silničních kolech. Nejen v důsledku pohodlnější polohy sezení, ale i lepší aerodynamiky, mohou v některých případech řidiči velomobilů dosahovat dojezdů až přes 1200 kilometrů. [26] Existují však i modely, které jsou speciálně navrženy pro závodění a překonávání rychlostních limitů [5]. Takový model se

nazývá Streamliner, který je možné vidět na Obr. 9. Streamlinery jsou jednostopé dvoukolové velomobily, které dokáží jet rychlostí až 144 km/h. Tyto modely nejsou vidány v běžném provozu, protože jejich tvrdá skořepina je velmi citlivá na turbulenci způsobenou bočním větrem. To by mělo katastrofické následky pro uživatele vozidla, pokud by nebyl profesionálním jezdcem, který má určité dovednosti v oblasti ovládání tohoto velomobilu. [27]

Posledním možným využitím jsou **nákladní velomobily**, které slouží především pro přepravu nákladů. Příklad nákladního velomobilu je možné vidět na Obr. 10. Tyto velomobily mohou mít různé konfigurace a kapacity. Buďto mohou být využívány pro doručování zásilek nebo pro převoz různých typů nákladů. Nákladní velomobily mají možnost vybavení různými typy přídatných návěsů, úložných boxů nebo plošin, což zlepšuje účel manipulace s nákladem. Případně lze dodat solární panel na střeše boxu, tím se ale zvýší hmotnost velomobilu. Tato vozidla znázorňují ekologičtější alternativu nákladních automobilů a umožňují se dostat do míst, kam se vozidla hromadné dopravy nedostanou, nebo přepraví náklady, které běžná jízdní kola nevezou. [28]



Obr. 10 Nákladní velomobil [28]

2 KONSTRUKCE VELOMOBILU

Kapitola o konstrukci velomobilů je důležitá z hlediska pochopení jejich funkce. V této kapitole je popsán detailní rozbor jednotlivých komponentů konstrukce, díky čemuž je možno lépe porozumět fungování velomobilů. Jednotlivé prvky konstrukce z velké části ovlivňují efektivitu, výkon a pohodlí při jízdě těchto dopravních prostředků. Proto je v této kapitole vedena diskuze o jednotlivých konstrukčních prvcích jako jsou například karoserie, materiály používané při výrobě, mechanismy řízení a zavěšení kol, brzdy a pohon. Je zde pojednáno i o různých designových prvcích, které vylepšují aerodynamické vlastnosti vozu a komfort jezdce.

Konstrukce velomobilů je známá tím, že vychází z konstrukce lehokol. Lehokola mají velké množství výhod oproti klasickým jízdním kolům. Například nemají sedlo, ale pohodlné sedadlo s oporou zad, případně i opěrkou hlavy [7]. Díky tomu jsou pohodlnější, ale také aerodynamicky efektivnější než je tomu u klasických jízdních kol [29]. Přidáním karoserie na lehokolo dojde nejen k již zmíněné ochraně jezdce před vlivy počasí, ale také k ochraně vnitřních prostor a jeho součástí. [7] Lehokolo je možné vidět na Obr. 11.



Obr. 11 Lehokolo [122]

2.1 KAROSERIE

Jak již bylo vysvětleno výše, karoserie velomobilu poskytuje mnoho výhod, které oponují běžným silničním kolům. Tím, že je uzavřená, poskytuje řidiči ochranu před počasím, což znamená, že řidič není při cestování deštěm nijak omezen. [30] Karoserie je často lehká, obvykle dělá hodně hluku při jízdě vyššími rychlostmi. Materiály, ze kterých jsou kapotáže vyráběny navíc bývají dost drahé, ale jsou i recyklovatelné. [13] Největším přínosem jsou především aerodynamické vlastnosti, díky kterým při jízdě z kopce dosahují velomobily vysokých rychlostí, kterých silniční kola nemusí dosáhnout. Tvar karoserie může být navíc uzpůsoben pro přepravu různých materiálů nebo je uzpůsoben tandemové jízdě [30].

Velomobily se vyrábí v různých konstrukčních provedeních, přičemž nejběžnějšími jsou tzv. **monocoque** a **body on frame (rámová)** [31]. Monocoque, jinak nazývaná samonosná karoserie, vychází z konstrukce známého Allewederu. Tento model má základní kostru vytvořenou z nýtovaných hliníkových plechů, která je propojená s tříkolkou, čímž je

vytvořena jednotná konstrukce. Původně bylo této metody využíváno při konstrukci letadel. Monocoque metoda využívající hliníkový plech je preferována kvůli nižší ceně hliníku. Skořepina jde také vyrobit i z jiného materiálu. Monocoque karoserie na bázi FRP je vyrobená z vláken, která mají vyšší poměr pevnosti k hmotnosti. Tímto způsobem je dosaženo redukce celkové hmotnosti až o několik kilogramů, což je velkým benefitem, který je však vyvážen vyšší cenou. [5] Snížené hmotnosti je též dosaženo díky samonosnosti konstrukce, tedy součásti jako zavěšení kol a jiné jsou přímo připevněny ke karoserii [32]. Monocoque karoserie především umožňuje přenášet tahová a tlaková napětí [33]. Skořepina bývá také doplněna o pomocné rámy ze svařovaných hliníkových trubek. Toto provedení konstrukce je možné využít i k vytvoření různých tvarů karoserie a zlepšit tak aerodynamické vlastnosti vozidla. To z ní činí lepší variantu oproti rámové konstrukci. Recyklace a separace FRP materiálů je sice náročná, avšak pro většinu uživatelů velomobilu může být vyšší cena za lehčí, rychlejší a aerodynamičtější velomobil přijatelným kompromisem. [5] Tento typ karoserie se vyskytuje u většiny současných velomobilů, jak klasických, tak i u některých elektrických. Příklad monocoque karoserie je možné vidět na Obr. 12.



Obr. 12 Karoserie monocoque [123]

Další možným konstrukčním provedením karoserie je tzv. **Body on frame**. To znamená, že konstrukce velomobilu sestává ze dvou hlavních částí. Základem je rám, na který je následně umístěna karoserie. [5] Rám je hlavní nosnou konstrukcí, kostrou celého vozidla, která podepírá vše ostatní. Nese všechny ostatní prvky vozidla, jako jsou například elektromotor nebo hnací ústrojí [34]. Na rozdíl od klasických velomobilů využívají elektrické velomobily, převážně městského typu, různé typy rámových konstrukcí. Jedná se například o příhradový rám, plošinový rám nebo prostorový rám. Patříčnou výhodou příhradového rámu je, že se vyrábí ze svařovaných ocelových trubek. [21][35] Příhradový rám je možné vidět na Obr. 13. Kromě ocelového rámu je možné použít i jiný materiál, jako je například hliník [28]. Svařovaný rám představuje levnější variantu, protože není potřeba drahých lisů a hodí se spíše pro malosériovou výrobu. Plošinový rám může být vyroben jako tzv. hliníkový sendvič, jehož výhodou je jeho lehkost a tuhost. Poskytuje také možnost recyklace. Hliníkový sendvič představuje dva hliníkové pláty, mezi kterými se nachází polyetylenové jádro. [35] Další možností rámu je prostorový rám vyrobený z hliníku. Tento rám je doplněn o hliníkové pláty, jež jsou lepeny a nýtovány, čímž je zvýšena pevnost celkové konstrukce oproti šroubovanému provedení. Kromě zvýšení tuhosti konstrukce splňují i další požadované vlastnosti, jako je odlehčenost konstrukce, recyklovatelnost a zpočátku nízké investiční náklady na výrobu. [36] Výhodou rámové konstrukce je speciální kování rámu, které zlepšuje celkovou přilnavost a odolnost. Umožňuje navíc libovolné tvarování a za použití lehkých materiálů může určitým

způsobem snížit hmotnost. Vzhledem k tomu, že karoserie nemusí být samonosná nebo konstrukční, existuje tak celá řada materiálů, které lze použít pro konstrukci karoserie. Výběr materiálů je dost rozmanitý, od tkaniny a překližky, až po sklolaminát nebo karbon. Kromě širokého výběru materiálů umožňuje tento typ konstrukce namontovat rozdílné karoserie na jeden rám, eventuelně použít samotný rám zcela bez karoserie. [5]



Obr. 13 Příhradový rám [21]

Materiál karoserie je velmi důležitý z pohledu efektivity a ekonomičnosti velomobilu. V dnešní době se hledají různé alternativy materiálů, které by byly výhodnější jak pro výrobu, tak pro následné použití. Pro výrobu karoserie velomobilu se využívá rozmanitého množství materiálů. Mezi nejpoužívanější materiály patří převážně kompozitní materiály jako karbon, kevlar, sklolaminát a další materiály, jako jsou různé termoplasty nebo také překližka. Poslední zmíněný materiál je využíván spíše pro amatérsky vyráběné velomobily. Hlavními cíli těchto materiálů je zvýšit pevnost karoserie a snížit celkovou hmotnost vozidla. S tím však přichází vyšší cena některých výše jmenovaných materiálů. Dalším požadavkem pro materiál karoserie je i jejich možná recyklace. [37][5]

Kompozitní materiály jako karbon, kevlar a sklolaminát jsou především využívány pro jejich výborné vlastnosti. Vykazují totiž vysoký poměr pevnosti k hmotnosti vzhledem k oceli. [8][38] Díky této vlastnosti jsou tyto materiály nepostradatelné v automobilovém a leteckém průmyslu. Mezi další velmi užitečné vlastnosti patří jejich flexibilita. Lze je použít k výrobě různě složitých tvarů a vzorů. Jsou také vysoce odolné vůči dynamickým nárazům. [39] Vlákna však musí být ve směru tažení, aby vznikající síly byly vlákny absorbovány pod napětím [8]. Další výhodou je jejich vysoká trvanlivost a již zmíněná možnost jejich recyklace. Kompozitní materiály jsou poměrně drahé vzhledem k jejich užitným vlastnostem a nákladným výrobním procesům. [39] Nejlepším materiálem z pohledu poměru pevnosti ku hmotnosti, je bezpochyby karbon. Karbon má až 10x větší pevnost v tahu než ocel [40]. Hustota karbonu je zhruba $1,6 \text{ g/cm}^3$ a v porovnání s hustotou oceli, která je kolem $7,8 \text{ g/cm}^3$ umožňuje snížení hmotnosti daného prvku až o 70 %. [41] Kevlar má oproti karbonu převahu v o něco nižší hmotnosti, nicméně karbon je o trochu lepší variantou vzhledem k vyšší pevnosti [42]. V neposlední řadě je zde sklolaminát. Ten vykazuje nejmenší pevnost v tahu ze všech tří zmíněných materiálů a v porovnání s nimi je i méně finančně

nákladný. Jeho hmotnost je sice o něco větší oproti karbonu a kevlaru, přesto poskytuje nižší hmotnost ve srovnání s ocelí [43].

Dalším využívaným materiálem při výrobě karoserie jsou termoplasty. Termoplasty bývají běžně využívaným materiálem pro karoserie typu monocoque. [5] Termoplasty lze využít pro výrobu široké škály tvarů karoserie, která zlepšuje aerodynamiku velomobilu [14]. Nejpoužívanějšími termoplasty při výrobě velomobilů jsou například PET, ABS neboli Trylon a další [13][44]. Tyto materiály se projevují o mnoho menší pevností než výše zmíněné kompozitní materiály, proto obsahují také přídatná vlákna, která zvyšují jejich poměr pevnosti ku hmotnosti. Přesto jsou ale pořád o něco lehčí než například karbon. [14][45] Termoplasty nabízejí také možnost recyklace, čímž je tento materiál šetrnější k životnímu prostředí. Nicméně recyklace je o trochu složitější z důvodu nutnosti oddělení složek materiálu.

Posledním materiálem, který je používán při výrobě velomobilu, je překližka. Tento materiál se běžně používá při výrobě elektrického velomobilu od firmy evovelo [46]. Je často využívána při stavbě individuálně vyráběných velomobilech [47]. Překližka je vyráběna na biologické bázi. Základní složkou, ze které je vytvořena, je dřevo. Mezi nejdůležitější přednosti tohoto materiálu patří především její pětinasobná lehkost oproti oceli, ale je i mnohokrát levnější než karbon. Další výhodou je snadná tvorba požadovaného tvaru, který lze snadno vyřezat. [47] Překližka je taktéž recyklovatelným materiálem [48]. Poněvadž je překližka založena na bázi dřeva, je třeba ji nějakým způsobem ošetřovat kvůli dešti a jiným nepříznivým podmínkám. Běžně se materiál ošetřuje například lakováním.

Součástí karoserie jsou i podběhy kol. Velomobily mohou mít buď otevřené nebo uzavřené podběhy kol. **Uzavřené podběhy kol** jsou tvořeny krytem, který zcela zakrývá kolo ze všech stran a poskytuje především lepší aerodynamiku vozidla. Jelikož jsou uzavřené, tak aerodynamicky nezáleží na tom, jak hluboko jsou kola umístěna. Uzavřené podběhy kol jsou často o něco větší, tudíž je možné použít širší pneumatiky. V případě předních kol, která jsou řízena, tento typ podběhů kol zvětšuje poloměr otáčení, jelikož kola nemají dostatečný prostor k pohybu. Pro uzavřené podběhy představuje demontáž nebo instalace kol, případně servis brzd, větší problém oproti otevřeným podběhům. V současné době existují i velomobily, které umožňují přístup k nápravám zvenčí karoserie díky poklopům pro údržbu. Tyto poklopy poskytují podobně jednoduchou údržbu, jak je tomu u otevřených podběhů kol. [7][8]

Otevřené podběhy kol umožňují, že jsou kola částečně nebo úplně viditelná z boku velomobilu. Z hlediska aerodynamiky jsou otevřené podběhy kol mnohem horší a je důležité, aby byla kola v jedné rovině s podběhy. U otevřených podběhů je důležité, aby kola neměla tak velký průměr, protože mezera mezi kolem a karoserií narušuje aerodynamické vlastnosti velomobilu. Jednodušší přístup ke kolům je samozřejmě výhodnější z hlediska údržby kol či jiných prvků. Pro otevřené podběhy kol je možné použít tzv. kalhot, které zlepšují aerodynamiku vozidla. Rozměrově sice rozšíří velomobil, jsou ale poměrně lehké a pružné. [8]

2.2 ELEKTRICKÝ POHON

Jak již bylo zmíněno, použití elektromotoru v konstrukci velomobilu je velmi velkým přínosem pro dosažitelný komfort jízdy. U současných velomobilů se používají elektromotory stejného typu jako na běžných elektrokolech. Norma ČSN EN 15194 (EPAC) [13] pro elektrokola stanovuje, že elektromotor má disponovat maximálním výkonem 250 W, který se

postupně snižuje a nakonec vypíná, jakmile vozidlo dosáhne rychlosti 25 km/h nebo pokud cyklista přestane šlapat do pedálů. V zásadě existují dva základní typy elektromotorů: středový motor a nábojový motor. Ten pak může být ve dvou variantách buďto nábojový motor s přímým pohonem nebo s převodovkou. [13]

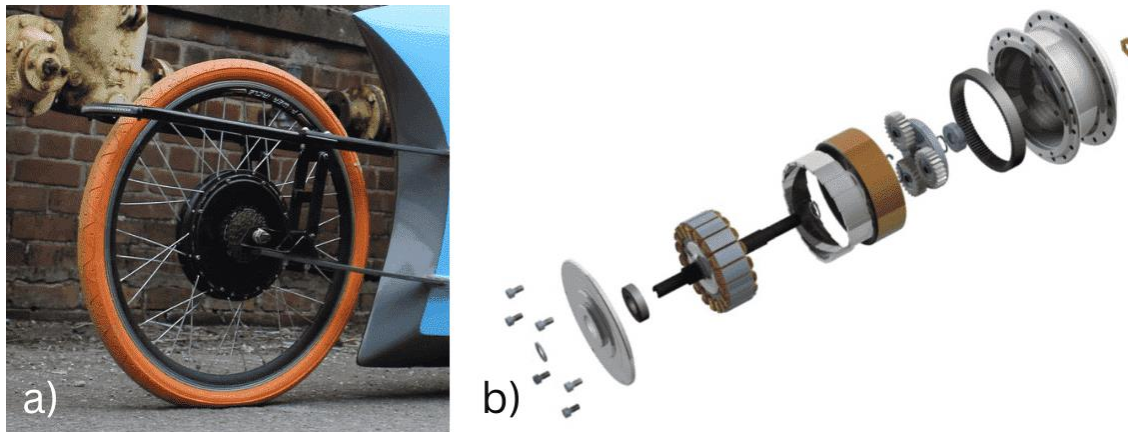
Motory se středovým pohonem jsou obvykle umístěny u pedálového mechanismu. Pro převod energie na kolo používají řetěz nebo řemen a těžší z jakéhokoli převodu mezi kolem a motorem. [13] Tento typ motoru má tu výhodu, že pokud řidič přeřadí, motor může efektivněji využívat dostupný výkon díky přímému přenosu síly přes převody, což zajišťuje optimální výkon a efektivitu [49]. Může tak pracovat při vyšších rychlostech a vzhledem k využití optimálního rozsahu rychlostí bez ohledu na sklon vozovky, tak nedochází k jejich přehřívání [8]. Ve srovnání s nábojovými motory stejného výkonu jsou motory se středovým pohonem obecně menší a lze je integrovat přímo do rámu. Kromě toho mají lepší vlastnosti při stoupání do kopce než nábojové motory. Nicméně vyžadují speciálně navržené rámy na míru a jsou také dražší variantou oproti nábojovým motorům. Motory se středovým pohonem však nabízejí i další výhody. Ve srovnání s nábojovými motory jsou lehčí, nabízejí tišší chod a dlouhou výdrž. [50] Narozdíl od nábojových motorů bohužel neposkytují rekuperaci [8]. Názorný příklad elektromotoru se středovým pohonem je možné vidět na Obr. 14.



Obr. 14 Středový elektromotor [57]

Jak již vyplývá z názvu, konstrukce nábojových motorů spočívá v jejich umístění v náboji kola. Existují dvě kategorie nábojových motorů: s přímým pohonem nebo s převodovkou. Oba tyto nábojové motory je možné vidět na Obr. 15. **Nábojové motory s přímým pohonem** nemají narozdíl od převodových nábojových motorů integrované žádné převodové prvky [51]. V konstrukci nábojových motorů s přímým pohonem je osa motoru pevná a skříň motoru se otáčí. Tímto způsobem funguje kryt motoru jako náboj kola, na kterém jsou připevněny paprsky kola. [13] V porovnání s elektromotory se středovým pohonem jsou hlučnější a mnohem těžší, čímž je i navýšena celková hmotnost vozidla. Vyžadují také poměrně častou údržbu. [50] Přestože umožňují jízdu ve vyšších rychlostech, jsou méně efektivní z hlediska úspory energie. Nejsou vhodnou volbou pro jízdu při dlouhých stoupáních, protože při nízkých otáčkách jim chybí točivý moment. [51] Z tohoto důvodu u nich dochází k přehřívání [8]. Vzhledem k menšímu točivému momentu i pomaleji akcelerují oproti motorům s převodovkou. Další nevýhodou je menší dojezd, který je zapříčiněn větší spotřebou energie z baterie z důvodu nutnosti dodávky většího výkonu. [51] Nábojové motory

s přímým pohonem poskytují i určité výhody. Velkým benefitem je schopnost rekuperace, kterou motory s převodovkou bohužel nedisponují, protože mají vestavěný mechanismus volnoběžky [13]. Motor dokáže brzdit, což mu umožňuje vrátit až dvě třetiny brzděné energie zpět do baterie. To je zejména velkým přínosem při dlouhodobé jízdě z kopce, když je nutné brzdit. [8] Mezi výrobce nábojových motorů s přímým pohonem patří například BionX, Crystalyte, 9Continent a další [14].



Obr. 15 a) Nábojový motor s přímým pohonem [124] b) Nábojový motor s převodovkou [13]

Nábojové motory s převodovkou používají ve své konstrukci ozubená kola, která přenáší rotační sílu z motoru na náboj, který otáčí kolem [51]. Tento typ motoru je lehčí a menší ve srovnání s motory s přímým pohonem [52]. Mezi jejich hlavní výhody patří především větší točivý moment vzhledem k planetovým převodům. Díky tomu poskytují lepší akceleraci velomobilu. [51] Dokáží také snadno zdolávat strmější stoupání s relativně malým výkonem [8]. Jejich výkon je menší a pohybuje se okolo 200 W. Jsou i energeticky účinnější než bezpřevodové nábojové motory. Ozubená kola totiž umožňují elektromotoru pracovat při vyšších otáčkách, což je účinnější. S efektivnějším využitím baterie se prodlužuje dojezd velomobilu až o 16 až 24 km, což je velkou výhodou pro řidiče. Nábojové motory s převodovkou vykazují také pár nevýhod, mezi které patří například nižší maximální rychlost nebo též větší hlučnost elektromotoru díky přítomnosti převodů. Elektromotory s převodovkou projevují větší náchylnost na opotřebení oproti motorům s přímým pohonem. Hlavní příčinou je opotřebení ozubených kol, které lze poznat pomocí skřípavého zvuku nebo sníženým výkonem motoru. [51] Nejznámějšími výrobci nábojových motorů s převodovkou jsou především Bafang, Heinzmann, eZee, BMC, a další) [14].

Některé velomobily využívají v konfiguraci s nábojovými elektromotory **pedálový generátor** s elektronicky řízeným odporem. Velkou výhodou tohoto systému je absence řetězu, který je nahrazen elektrickými kabely. Není tak potřeba žádných převodů, což umožňuje lepší využití prostoru. Při šlapání je z generátoru možné buďto energii ukládat do baterie pro její pozdější využití, nebo lze napájet elektromotor přímo. Efektivní provozní stav je dosažen při určitém rytmu šlapání, který optimalizuje produkci energie, což může být užitečné při jízdě do kopce nebo při delších cestách, kdy je nutné udržet konstantní rychlost. Tato technologie je výhodná, avšak síla potřebná k pohybu velomobilu je stále závislá na síle řidiče. Systém navíc umožňuje jízdu pozpátku, dokonce i rekuperaci energie prostřednictvím elektromotoru jak již bylo zmíněno výše. Pedálového generátoru využívá například čtyřkolový nákladní velomobil GoLo. [13][53]

2.3 BATERIE

Baterie jsou klíčovým prvkem při poskytování elektrické asistence při jízdě ve velomobilu. Obvykle se dají nabít běžným způsobem z elektrické sítě pomocí zásuvné nabíječky nebo také rekuperačním brzděním. [13] Dojezd vozidla závisí na kapacitě baterie, která je ovlivněna mnoha parametry. Mezi hlavní patří například velikost baterie, průměrná rychlost, kterou se vozidlo pohybuje, typ terénu, povětrnostní podmínky a další faktory. Tato variabilita často způsobuje strach z dojezdu, pokud je baterie vybitá. Navíc, když se baterie vybije, tak šlapání může být náročnější z důvodu přidané hmotnosti baterie. [54] Velká spotřeba energie z baterie se projevuje zejména při stoupání velomobilu do kopcovitého terénu [8]. Velkou spotřebu energie z baterie mohou některé velomobily omezit pomocí rekuperace energie při brzdění. Baterie tak může být nabíjena při jízdě z kopce, když dochází k brzdění. Při použití elektromotoru s rekuperačí je dojezd velomobilu až dvojnásobně větší než na běžném jízděm kole. [13] Baterie jsou volně vyjímatelné a tím, že se nachází v interiéru vozidla, tak je zajištěna zvýšená životnost, protože nejsou vystaveny nepříznivým povětrnostním podmínkám, prachu, vlhkosti a nečistotám z okolního prostředí. [8][55]

V mnoha parametrech jsou nejpoužívanějším typem baterií ve velomobilech **lithium-iontové**. Mezi jejich klíčové vlastnosti patří zejména dlouhá životnost, vyšší hustota energie a také vyšší výkon na jednotku hmotnosti baterie. Díky tomu jsou lehčí a menší než jiné dobíjecí baterie. [56] Kromě velmi vysoké měrné energie má každý lithium-iontový článek výhodu generování relativně vysokého napětí 3,7 V, což pomáhá snížit počet článků zapojených do série. Další výhodou je vysoká efektivita a nízká rychlost samovybití. [55] Nevyžaduje údržbu, protože není téměř ovlivněn paměťovým efektem [50]. Velkou výhodou je i jejich snadná recyklace, která je v dnešní době zásadní [13]. Kromě kladných vlastností lithiových baterií existují i určité nevýhody. Jednou z nevýhod je poměrně vysoká cena v porovnání s jinými typy baterií nebo také stárnutí baterie, které je závislé na počtu cyklů nabíjení/vybíjení. [50] Bývají velmi citlivé na teplotu a článek se může při přebití zničit. Proto se vyžaduje, aby byl používán ochranný systém a to tzv. systém správy řízení (BMS). Ten zachovává funkčnost, bezpečnost a životnost baterie. BMS monitoruje napětí článku, provozní parametry a řídí proud vcházející nebo vycházející ze článku. Tím předchází například přetížení nebo již zmíněnému přehřátí. [55][13]

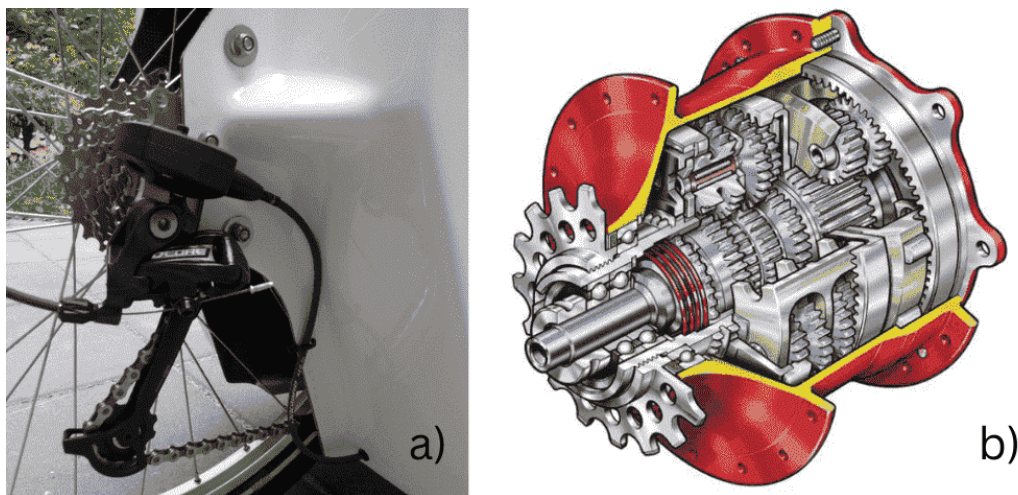
Než se přešlo na lithium-iontové baterie, tak se kdysi používaly olověné baterie [13]. Tento typ baterií má v porovnání s lithiovými bateriemi mnohem menší hustotu energie. Dále mají nízký nabíjecí proud, který má za následek dlouhou dobu nabíjení. Doba nabíjení je až třikrát delší v porovnání s lithiovými bateriemi. [55] Mezi důvody, proč se přestaly používat olověné baterie můžeme zařadit například i jejich vysokou toxicitu [56]. Dalším důvodem je také jejich vysoká hmotnost, která by prakticky znemožňovala jejich aplikaci v rámci velomobilu. [13].

2.4 PŘEVODOVÉ MECHANISMY

Velomobily používají podobné převodové mechanismy (systémy) jako klasická jízdní kola nebo lehokola. Jedná se především o vnější převodové systémy, tzv. přehazovačky nebo o vnitřní nábojové převodovky. Obě možnosti lze vidět na Obr. 16. Některé velomobily mohou využívat kromě těchto mechanismů i převodovky, které se nacházejí přímo u šlapadel a nahrazují tak převodníky. Účelem převodových systémů je poskytnout rychlou a plynulou změnu převodů, čímž si cyklista může upravovat zátěž v závislosti na obtížnosti terénu. Výrobci často vzájemně kombinují jednotlivé mechanismy, aby dosáhli požadovaných

převodů. Možná je i kombinace s elektrickými pohony, které přispívají k pohodlnější a efektivnější jízdě. [57][58]

Prvním zmíněným mechanismem jsou tradiční **přehazovačky**. Převodový systém přehazovačky se skládá z kazety a převodníků. Kombinace těchto dvou poskytuje celkový rozsah převodů. Nejběžnějšími přehazovačkami využívanými na velomobilech jsou od značky Shimano nebo Sram. Obecně platí, že přehazovačky jsou lehčí, levnější a účinnější v porovnání s nábojovými převodovkami [58]. Výhodnou vlastností tohoto převodového systému je dosažení velmi vysokého převodového stupně [59]. Problémem je však jejich častá potřeba servisu a údržby. Jsou totiž poměrně citlivým mechanismem, který vyžaduje přesné nastavení. Může dojít k jejich poškození nebo vychýlení, protože jsou vystaveny povětrnostním vlivům a jsou snadno poškoditelné v případě pádu kola. Vychýlení může způsobit vybočení řetězu z hnacího systému, čímž může dojít k zablokování další pohyblivé části jízdního kola a způsobit náhlou změnu rychlosti nebo směru jízdy. [60] Další nevýhodou, kterou přehazovačky představují je, že převodové stupně nelze měnit, pokud velomobil stojí na místě. Mezi problémy lze zařadit i neefektivní využití dostupných převodových poměrů a velikost kroku mezi jednotlivými převodovými stupni [59]. Kazety mohou mít buďto osm, deset nebo jedenáct rychlostí a bývají většinou v kombinaci s třemi převodníky. Někdy je možná kombinace i s dvěma převodníky. Rozsah zubů na kazetě je možný od 11 až po 42 zubů. K řazení převodů se používají mechanické páčky, které se nacházejí na koncích řídek velomobilu. Tyto páčky se mohou otáčet buďto kolem svislé nebo kolem horizontální osy. [57][58]



Obr. 16 a) Přehazovačka [57] b) Rohloff Speedhub [61]

Další variantou převodových systémů jsou **vnitřní nábojové převodovky**. Nábojové převodové systémy jsou nenáročné na údržbu a snadno se ovládají. Jednou z největších výhod nábojového převodového systému je schopnost řadit rychlostní stupně při zastavení. Rozjíždění s příliš vysokým převodovým stupněm proto nepředstavuje takový problém, jako je tomu u přehazovaček. [58] Jednou z možností nábojové převodovky je Rohloff Speedhub, což je plně zapouzdřený bezúdržbový převodový mechanismus o čtrnácti převodech [61]. Mezi přednosti tohoto systému patří značné snížení potřeby časté údržby, zvýšení spolehlivosti a výhoda lineární vzdálenosti mezi sousedními převodovými stupni. Ve srovnání s přehazovačkami jsou Rohloff Speedhub převodovky dražší a navyšují hmotnost velomobilu. Kromě toho ale poskytují velmi vysoké převodové poměry. Jejich hlavní nevýhodou je, že u

nich nelze dosáhnout konečného počtu převodů, čímž nemohou využít plný potenciál elektromotoru nebo cyklisty. [59] Možnou alternativou vnitřní nábojové převodovky je NuVinci. NuVinci je převodovka s plynule měnitelným převodem, která se vyznačuje více než dvojnásobně zvýšenou hmotností v porovnání s běžnými typy přehazovaček. Oproti Rohloff převodovkám a modernějším přehazovačkám mají zdatelně nižší maximální převodový poměr 380 %. Možnost elektrického řízení a plynulého nastavení převodového poměru pro řízení momentu může vézt ke zlepšení provozních podmínek elektromotoru, ale i jízdních podmínek řidiče velomobilu. V neposlední řadě se používají Shimano Alfine, který představuje epicyklický náboj. Vnitřní mechanická konstrukce náboje má dvě stupňovité planetové řady, které poskytují 8 až 11 rychlostí. Poskytují maximální rozsah převodů 409%. Hmotnost této nábojové převodovky je přibližně 1,6 kg. [62]

Možnou variantou integrovaných převodovek je dvanácti rychlostní převodovka Pinion C1.12. Tato převodovka je umístěna vpředu v oblasti pedálů velomobilu. Díky ní může být zadní kolo navrženo jednodušeji a místo trojice převodníků je pro přenos energie použit pouze jeden. [57]

2.5 ŘÍZENÍ

Řízení je u velomobilů provedeno ve dvou základních variantách. Jedná se buď o tzv. **nadsedadlové řízení**, také nazýváno OSS (overseat steering) nebo o **podsedadlové řízení**, neboli USS (underseat steering). Názorný příklad OSS řídicího systému je vidět na Obr. 17. U nadsedadlového řízení, jak už vyplývá z názvu, se řídítka nachází přímo před jezdce nad úroveň sedadla. [63] Tento typ řízení je podobný systému kormidel, proto je také nazýváno jako tzv. kormidlové řízení (tiller steering) [8]. Systém řízení je realizován pomocí řídítek ve tvaru T nebo Y, která jsou propojena s řídicí tyčí kardanovým kloubem [11].



Obr. 17 OSS řídicí systém [125]

Řídicí tyč může být buďto dělená na dvě části nebo spojitá. Zatímco u nadsedadlového řízení přenáší řídicí tyč pohyb přímo na kola, u podsedadlového řízení páky působí přímo na klouby řízení a řídicí tyč plní pouze funkci spojení obou kol. Nadsedadlový řídicí systém umožňuje volný pohyb řídítek do všech stran, aniž by došlo k pohybu velomobilu. Až následnou rotací řídítek dochází k zatáčení velomobilu. [8] Mezi hlavní přednosti tohoto druhu řídicího systému patří menší složitost konstrukce a také nižší hmotnost, nicméně není

tak populární variantou jako je podsedadlové řízení. Důvodem je totiž únava paží, protože zde není možnost opření loktů o opěrky jako je tomu u druhé varianty [11].

Druhou variantou řídicího systému je podsedadlové řízení, které je vidět na Obr. 18. USS představuje řízení pomocí dvou vzájemně propojených pák po obou stranách řidiče. Princip řízení spočívá v pohybu pákou vpřed. Jestliže necháme páky v klidovém stavu, vozidlo pojede rovně. Kvůli vzájemnému propojení pák lze využít řízení pouze jednou rukou. [64] Velomobil Frikar má i tu možnost, že jsou páky sklopné, čímž je nástup a výstup z vozidla mnohem pohodlnější [65]. USS má větší hmotnost oproti OSS [11]. Přesto tento způsob řízení nabízí větší komfort při jízdě ve srovnání s OSS. Některé modely velomobilů poskytují vyšší komfort řízení, který spočívá v opření předloktí o opěrky, což umožňuje pohodlnější pozici rukou. [63] Poloha pák je pevná, tudíž poskytuje přesnější a rychlejší ovládání velomobilu [8]. Vzhledem k tomu, že je USS citlivější, tak je potřeba poměrně krátký pohyb paží, abychom dosáhli výrazného otočení předního kola [63]. To může někomu více vyhovovat zejména při závodech. Díky podobnosti s řízením tanku je tento způsob řízení také jinak nazýván tankové řízení (tank steering). [8] Dalším možným způsobem řízení je pomocí jedné páky, která je nazývána joystick. Ta se nachází hned vedle řidiče. Tohoto řídicího systému využívá například elektrický velomobil Twike 3, jehož princip spočívá v obyčejném otáčení páky do stran. [66]

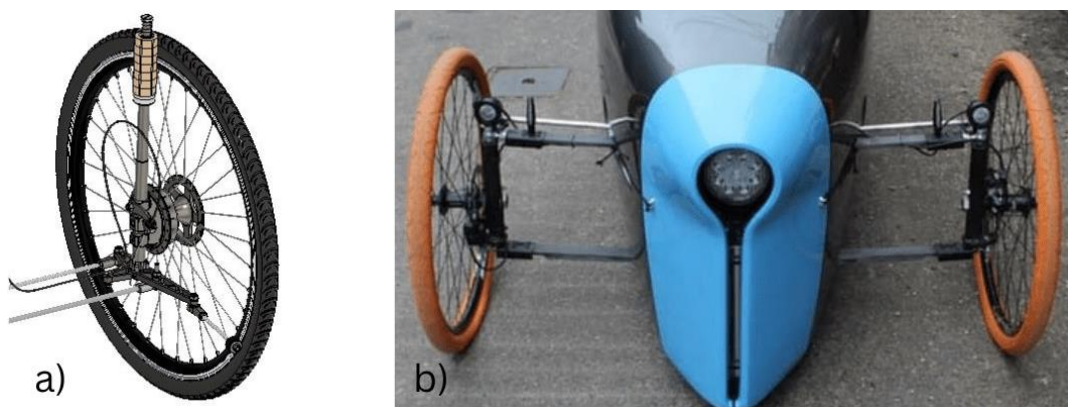


Obr. 18 USS řídicí systém [57]

2.6 ZAVĚŠENÍ KOL

Odpružení hraje u velomobilů důležitou roli. Má totiž vliv na mnoho aspektů, které ovlivňují chování vozidla za jízdy. Odpružení dokáže absorbovat nárazy vytvořené jízdou po nerovnostech a hrbolech na vozovce, čímž poskytují jezdci mnohem lepší komfort z jízdy než bez odpružení. Bez odpružení by se každý náraz přenesl do řidiče, což by bylo dosti nepříjemné. Proto je důležité, aby ztráty energie způsobené nerovnostmi povrchu byly co nejmenší a řidič mohl dosahovat vysokých rychlostí i bez zbytečného plýtvání energie. S tím souvisí i ovladatelnost a stabilita vozidla. Odpružení přispívá k lepší ovladatelnosti tím, že udržuje kontakt pneumatiky s vozovkou i na nerovném povrchu. Zlepšuje tak i stabilitu v zatáčkách. [8][13][24]

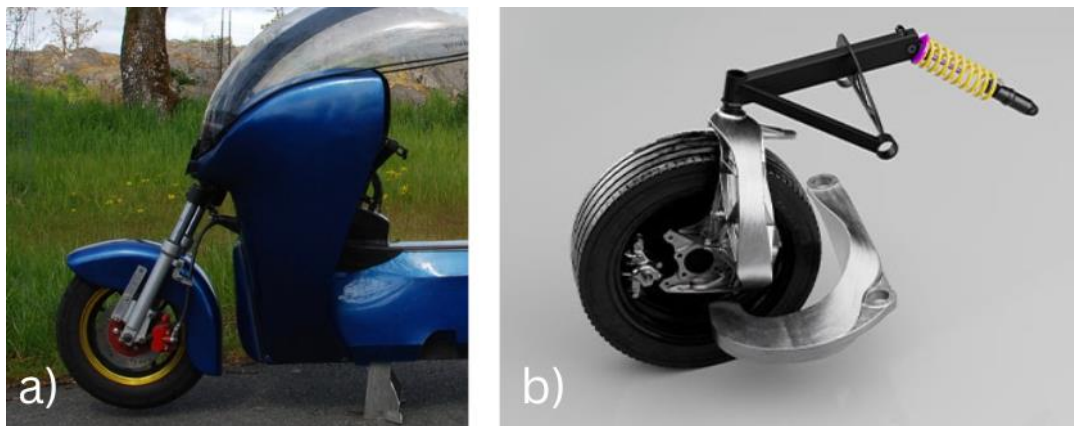
Pokud se jedná o zavěšení **přední nápravy** velomobilů, většina klasických, ale i elektrických velomobilů se dvěma koly vpředu převážně využívá zavěšení typu MacPherson [8]. Příklad závěsného systému MacPherson je vidět na Obr. 19. Tento typ konstrukce zavěšení je nejvíce využíván v automobilním průmyslu [24]. Zavěšení MacPherson má mnoho výhod, jako je nezávislé použití jako tlumič a schopnost udržet kolo ve směru odklonu. Tlumič funguje zároveň jako vzpěra, která je uchycena ke karoserii velomobilu a umožňuje i rotační pohyb. [67] Mezi výhody tohoto typu zavěšení patří primárně jeho nízká hmotnost a malé rozměry v důsledku menšího počtu dílů. Tím, že se jednotlivé komponenty nacházejí relativně nízko a směrem do strany, poskytují tak dostatečně velký prostor pro řidiče vozidla. Nevýhodou tohoto systému zavěšení je relativně velké množství dílů vyráběných na zakázku. [24]



Obr. 19 a) MacPherson [125] b) Listové pružiny [124]

Jiným používaným druhem zavěšení kol je víceprvkové (multilink) [35]. Víceprvkové zavěšení kol je vysoce výkonným systémem, který poskytuje značnou flexibilitu a lze jej použít na různé typy vozidel [68]. Jeho největší výhodou je, že je ortogonální. Tím usnadňuje změnu jednoho parametru zavěšení, aniž by to ovlivnilo celou sestavu. Další výhodou je lepší jízdní komfort. Mezi jeho nevýhody patří především složitost konstrukce a vyšší náklady na údržbu a opravy. [69] Některé elektrické velomobily řeší zavěšení kol trochu jiným způsobem než klasické velomobily. Dalším možným typem zavěšení předních kol je pomocí listových pružin. Názorný příklad listových pružin je možné vidět na Obr. 19. Tento systém zavěšení využívá například el. velomobil 428 od společnosti Northern Lights Motors. Listové pružiny z uhlíkových vláken procházejí podvozkem a jsou schopny se ohýbat. Jejich velkou nevýhodou je, že odpružení má menší schopnost tlumení a postrádá také anti roll. [70] Mezi výhody patří například efektivní opora mezi kolem a podvozkem vozidla, jednoduchá konstrukce a v porovnání s ostatními pružinovými závěsy i levná výroba [71]. Přední odpružení je možné realizovat i pomocí vylepšeného dynamického tlumiče. Jde o neoprenový elastomerový svazek s uzavřenými buňkami. Nabízí dostatečnou pružnost, díky které poskytuje plynulou jízdu a pohotovou ovladatelnost vozidla. [44]

Velomobily mohou být také konfigurovány s jedním předním kolem. V důsledku toho se používají jiné typy náprav. Jednou z možných variant závěsného systému jednokolové přední nápravy je vidlice klasického jízdního kola, kterou používá již zmíněný Electrom [72]. Další možnou konstrukcí zavěšení přední nápravy s jedním kolem je speciální kyvné rameno s pevnou osou, jako je tomu u modelu Twike5. Obě možné varianty jsou vidět na Obr. 20.



Obr. 20 a) Vidlice [72] b) Speciální kyvné rameno [126]

Zavěšení **zadní nápravy** je u velomobilů s jedním zadním kolem řešeno nejčastěji pomocí kyvného ramene. Kyvné rameno je možné vidět na Obr. 21. Tento systém zavěšení se běžně používá jako zadní zavěšení u motocyklů. Kyvné rameno může být buď jednostranné nebo oboustranné. Jednostranné kyvné rameno musí být mnohem pevnější oproti oboustrannému, aby bylo podobně torzně tuhé. Výhodou jednostranné kyvné vidlice je lehká a rychlá výměna kola v případě poruchy. [8] Nevýhodou tohoto typu zavěšení je, že má střed naklání na úrovni vozovky. V případě potřeby je to možné omezit přidáním stabilizační tyče, která snižuje náklon vozidla při průjezdu zatáčkou. Mezi výhody patří například větší prostor pro řidiče nebo pro zavazadla. Poskytuje také zvýšený komfort z jízdy. [24] Kyvné rameno je možné doplnit buďto o tlumič s pružinou nebo o běžný vzduchový tlumič, který se vyskytuje i na jízdních kolech. Vzduchový tlumič je možné libovolně nastavit a lze jej i úplně zablokovat. [73]



Obr. 21 Jednostranné kyvné rameno [127]

Zavěšení velomobilů se dvěma zadními koly je taktéž možné realizovat pomocí zavěšení MacPherson. Lze jej využít pro získání většího zavazadlového prostoru navíc. Nevýhodou je náročná realizace tlumiče ve vzpěře, která také potřebuje spojovací systém, jako tomu bylo u zavěšení předního kola. [24] Alternativně je pro zavěšení zadních kol možné využít lichoběžníkové nápravy. Tento druh nápravy je využíván zásadně off roadovými vozidly. Z velomobilů je používán nákladním velobilem Velove Armadillo od společnosti

Flevobike. Jedná se o velmi jednoduchý systém s dobře a lehkou nastavitelným odpružením [24]. Tento druh zavěšení je známý především svými dynamickými vlastnostmi, ale i větší únosností [74]. Na rozdíl od vzpěry MacPherson, který poskytuje větší záporný odklon kola pouze na začátku zdvihu, lichoběžníkové zavěšení nabízí větší nárůst záporného odklonu kola až do maximálního zdvihu [75]. Zabírá také více místa mezi koly, čímž je omezen prostor, který by byl lépe využitelný. Pokud se jedná ale o nákladní velomobil, tak to takový problém není. [24]

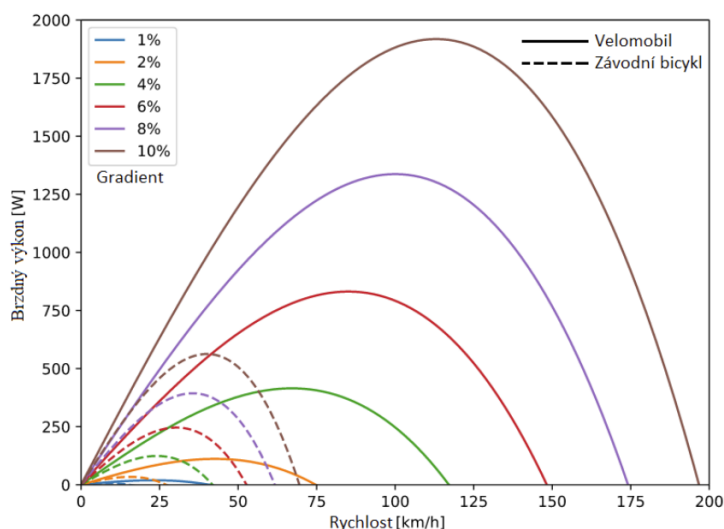


Obr. 22 Zavěšení zadní nápravy modelu Twike 5 [126]

Speciálním případem zavěšení zadních kol je tzv. DeDion, které kombinuje nezávislé zavěšení s tuhým nápravou. Tato kombinace zavěšení poskytuje konstantní úhel odklonu, který se nemění při rozjezdu vozidla. Všechny ostatní funkce jsou stejné jako u normálního nezávislého zavěšení. Mezi výhody je možné zařadit hospodárnost a vysokou jízdní dynamiku vozidla. Nevýhodou zmíněného závěsného systému je zakázková výroba speciálních komponent. [76] Příklad této konstrukce zavěšení je vidět na Obr. 22.

2.7 BRZDY

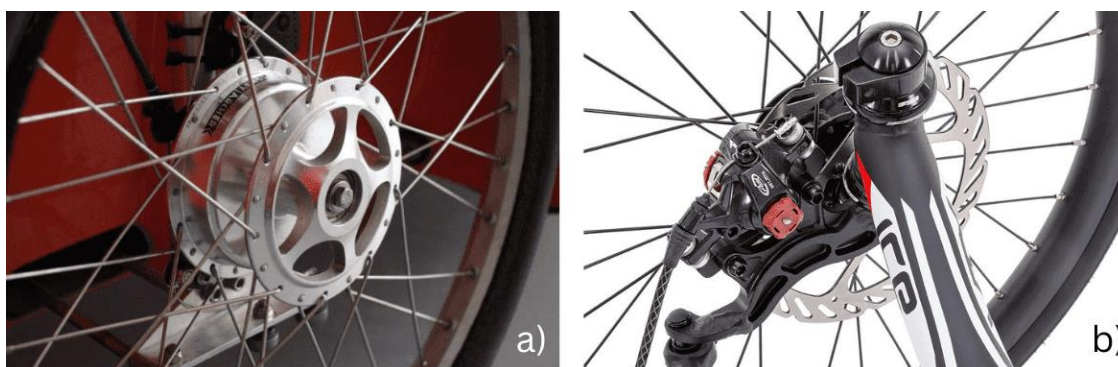
Oproti běžným jízdním kolům se velomobily dokáží pohybovat mnohem vyššími rychlostmi nejen díky své aerodynamické karoserii. Musejí tedy vyvinout značně větší síly při brždění, a to především při jízdě z kopců o delší vzdálenosti, což je možné vidět na Obr. 23. Během brždění dochází u velomobilů k přenosu větší hmotnosti na přední kola, čímž se zvýší třecí síla nutná k zastavení vozidla. Navíc je zadní kolo dále od těžiště, takže je při brždění méně zatíženo. To pak způsobuje, že se snadněji protáčí na kluzké vozovce. Dalším problémem je, že brzdy velomobilu jsou méně chlazené, jelikož se mohou nacházet v podběžích kol. To způsobuje jejich přehřívání, které je nutné nějakým způsobem odvádět, případně ho eliminovat. Nejúčinnější metodou, jak ochladit brzdy jsou chladičí žebra nebo je možné brzdy méně zatěžovat a brzdit přerušovaně. [8] Velomobily používají dva základní typy brzd, v první řadě jsou to bubnové brzdy a v druhé řadě pak kotoučové brzdy.



Obr. 23 Porovnání brzdných sil při jízdě z kopců o různých gradientech [8]

Bubnové brzdy, jež je možné vidět na Obr. 24, jsou více používány u běžných velomobilů, protože mají dobré aerodynamické vlastnosti oproti kotoučovým brzdám. Ty totiž zabírají více místa v podběžích kola, což působí problém při zatáčení. [8] Hlavní výhodou bubnových brzd je, že brzdový mechanismus je uzavřený v plášti náboje kola. Jsou také spolehlivé a nenáročné na údržbu. Brzdové čelisti s dlouhou životností mohou ujet až desítky tisíc kilometrů než dojde k jejich výměně a vyžadují velmi malou údržbu kromě seřízení lanek, protože se pomalu opotřebovávají. [77] Další výhodou je jejich nižší cena v porovnání s kotoučovými brzdami [78]. Poskytují solidní a spolehlivé brždění a jsou vhodnou volbou pro Tadopole velomobily [11]. Mezi největší nevýhody patří jejich uložení v bubnu, které má za následek horší odvod tepla. Dochází u nich totiž k rychlejšímu přehřívání, které způsobuje znatelné snížení brzdného účinku, oproti kotoučovým brzdám. [8] Další nevýhodou tohoto druhu brzd je špatná funkce brzd za vlhkého počasí (pokud se do bubnu dostane vlhkost) a také náchylnost k vyblednutí vlivem tepla [11].

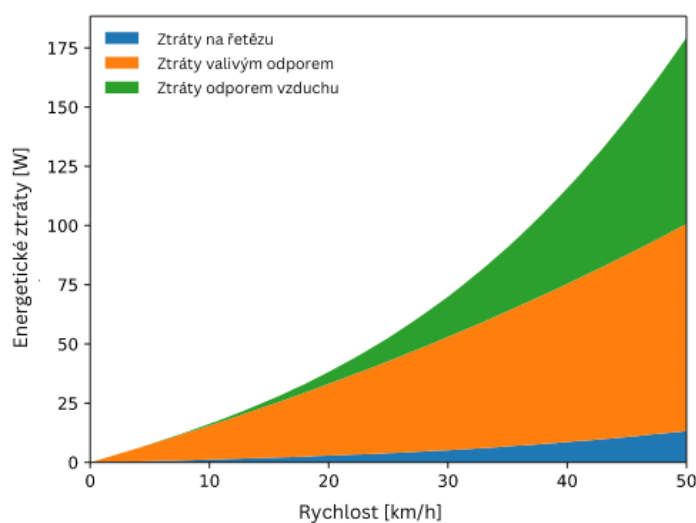
Kotoučové brzdy nabízejí výborný brzdový účinek a jsou lehčí na rozdíl od bubnových brzd. Za to jsou náročnější na údržbu. Vzhledem k tomu, že nejsou chráněné jako bubnové brzdy, dochází k jejich častějšímu znečištění a jsou i méně aerodynamické. [77] Dochází u nich k častému opotřebení brzdových destiček a ohnutí brzdového disku způsobí cinkání či jiné podobné zvuky. [78] Jak již bylo zmíněno, tak jsou dražší variantou [11]. Kotoučové brzdy se vyskytují ve dvou hlavních variantách: mechanické a hydraulické. Mechanické brzdy používají systém tažení lanka, zatímco hydraulické systémy používají k přenosu brzdné síly kapalinu. Mechanické kotoučové brzdy jsou méně efektivní v porovnání s hydraulickými brzdami, protože síla působící na páku je větší než výsledná síla na třmenu. [79] Mezi přednosti hydraulických kotoučových brzd patří poměrně bezztrátový přenos síly a menší potřeba pravidelné údržby. Dále poskytují velmi efektivní zpomalení vozidla s využitím velmi malých sil, které musí jezdec při jejich ovládnutí vynaložit. [80] Mechanické brzdy mají nižší pořizovací náklady než hydraulické brzdy a jsou taktéž lehčí [79]. Příklad kotoučové brzd je vidět na Obr. 24.



Obr. 24 a) Bubnová brzda [57] b) Kotoučová brzda [77]

2.8 KOLA

Kola jsou velmi důležitou součástí všech druhů jízdních kol. Technologie pneumatik se sice zdokonaluje, avšak pneumatiky jsou stále hlavní příčinou ztráty energie při odvalování kola po povrchu vozovky. Vlivem valivého odporu dojde při jízdě rychlostí 36 km/h na nezávodním jízdním kole na běžných pneumatikách ke ztrátě 40-50 W. [13] U velomobilů je to jiné. Mállokterý řidič dokáže jet stálou rychlostí 50 km/h, kdy začíná převládat odpor vzduchu nad valivým odporem. Proto je v tomto případě podíl valivého odporu větší než podíl odporu vzduchu a dominuje tak po většinu času jízdy. Z tohoto důvodu jsou pro velomobil důležité dobré pneumatiky, aby snížily valivý odpor. [8] Valivý odpor však závisí na mnoha parametrech. Mezi hlavní patří složení pryžové směsi pneumatiky, hmotnost vozidla, rychlost vozidla, teplota povrchu vozovky, teplota pneumatik a druh povrchu vozovky. Dále jsou pak důležité rozměry pneumatik, tlak v pneumatikách a další. [81] V zásadě platí, že čím tenčí pneumatika je, tím snadněji se odvaluje [13]. Na Obr. 25 je možné vidět porovnání ztrát na řetězu, vlivem valivého odporu a odporu vzduchu.



Obr. 25 Porovnání ztrát na řetězu, vlivem valivého odporu a odporem vzduchu [8]

U velomobilů se setkáváme s různou variabilitou **velikostí kol**. Pro úsporu místa, hmotnosti a nákladů je menší průměr kol lépe využitelný. Velké množství velomobilů využívá 20“ kola. [13] Tříkolové velomobily využívají menší přední kola hlavně kvůli úspoře prostoru. Větší velikost předních kol by znamenala zvýšení přední části karoserie a protože jsou řízena přední kola, tak by podběhy kol musely být dostatečně hluboké, což by značně rozšířilo karoserii. Dalším důvodem je, že řidič velomobilu potřebuje dostatečný prostor pro šlapání, který mu poskytují menší kola. [8] Přední kola většího průměru navíc zvětšují poloměr otáčení [11]. Pro zadní kolo je více místa za hlavou, výška vozidla tak zůstává stejná a neovlivňuje aerodynamiku vozidla. Velké kolo má lepší valivý odpor a také přenáší sílu šlapajícího řidiče na vozovku. To má lepší účinek na delší vzdálenost oproti menšímu kolu, které by se muselo otáčet rychleji při stejné rychlosti. Menší zadní kolo je však výhodné při stoupání do kopce, protože vyvíjí vyšší točivý moment. Velikost zadního kola se používá ve více variantách, přitom nejběžnějšími jsou pak 26“ nebo 28“. Druhá zmíněná velikost je především pro závodní a sportovní velomobily. [8] Velká kola mají taktéž větší hmotnost, která je nežádoucím parametrem u velomobilů [11]. Čtyřkolové velomobily využívají především stejnou velikost kol a to převážně 20“ [13].

2.9 SEDADLO

Sedadlo velomobilů je klíčovým prvkem, který ovlivňuje pohodlí a výkon jezdce. Šířka a tvarování sedadla mohou ovlivnit rozložení váhy řidiče a snížit tak tlak na citlivé oblasti těla. [4] Na rozdíl od klasického bicyklu, kde je největší tlak na sedací svaly, tak u velomobilů je celá váha rozložena na poměrně velkou plochu anatomicky tvarované sedačky [4]. To je velkým přínosem při cestování na dlouhou vzdálenost. Častým problémem při volbě sedadla může být hmotnost, která hraje zásadní roli. Může totiž ovlivnit celkovou váhu velomobilu a snížit tak jeho výkon. Výrobci se proto mnohdy snaží najít kompromis mezi různými materiály a konstrukcemi, aby dosáhli ideálního poměru mezi pevností a hmotností či komfortem. Sedadla proto můžeme dělit do dvou základních skupin na síťovaná sedadla a skořepinová sedadla. Někdy je možná kombinace obou. [11][77]



Obr. 26 Sedadlo velomobilu [128]

Pro výrobu skořepinových sedadel existuje velká škála používaných materiálů. Mohou být vyrobena například z termoplastů nebo karbonu, přičemž některá sedadla nabízí pohodlný látkový potah nebo kožené či jiné polstrování s pěnovým jádrem. [11][77][82] Síťovaná sedadla mají oproti jednokusým sedadlům z pevného materiálu výhodu vynikající ventilace

zad. Ventilace je užitečná pro snížení přehřátí a tím pádem udržení pohodlí během jízdy, zejména za teplého počasí. Za chladnějšího počasí je prodyšnost problémem, dochází totiž k proudění studeného vzduchu na řidičova záda. [83] Některá sedadla mohou být rozšířena o nastavitelnou opěrku hlavy. Tyto opěrky lze doplnit o polstrování, které zpříjemní pocit z jízdy. Dále je možné nastavit polohu sedačky na určitý sklon a délku například pomocí rychloupínacího mechanismu. Sedadla jsou také rychle odnímatelná, což usnadňuje údržbu a přizpůsobení velomobilu podle potřeby. [82] Sedadlo velomobilu je možné vidět na Obr. 26.

2.10 PŘÍSLUŠENSTVÍ

Tím, že jsou velomobily klasifikovány jako jízdní kola, mají možnost jízdy po cyklostezkách, ale i po městských silnicích [84]. Přesto pro ně platí stejná pravidla silničního provozu jako při řízení motorového vozidla [5]. Aby byly velomobily viditelné za jízdy, mají v karoserii zakomponovány mnoho různých bezpečnostních prvků. Vzhledem k podobnosti s automobily se jedná například o integrovaná světla, která se nacházejí jak vpředu, tak i vzadu. Tato světla poskytují lepší viditelnost za špatných světelných podmínek nebo za nepříznivého počasí. [84] Dále se na karoserii mohou vyskytovat boční světla a směrová světla [57]. Zadní světla mohou skrývat radar, který detekuje auta nacházející se za řidičem, GPS sledování v případě krádeže kola nebo plní funkci brzdových světel [83]. Primárně se používají LED diody, ale je možné vidět i halogenová světla [66]. Led diody jsou převážně malé, úsporné a mají schopnost blikat [83]. Krom světel je na karoserii možné nalézt i odrazky. To však záleží, pro jakou zemi jsou vyrobeny z hlediska předpisů. [35]

Dalším potenciálním přídatným prvkem jsou zrcátka. Ta jsou důležitou součástí, bez kterých by se řidič musel obtížným způsobem otáčet dozadu. Zrcátka mu poskytují lepší přehled o situaci na silnici. Většinou je můžeme najít po stranách vozidla. [5][83] Vyskytují se především tři typy modelů zrcátek od značek B&M, Zefal a Cone [85].

Protože uzavřené velomobily umožňují jízdu i za deště a horšího počasí, do výbavy velomobilu je proto doporučeno přidat také stěrače. Přestože nejsou součástí všech velomobilů, je možné je vidět primárně ve dvou variantách. Existují jak elektrické, tak i manuální. Elektrické stěrače zvyšují hmotnost kvůli dodatečnému motoru a baterii. Manuální stěrače je nutno ovládat ručně zevnitř vozidla. Některé manuálně ovládané stěrače používají dvou podlouhlých magnetů, které se nacházejí na obou stranách skla. [7][8][86]

Dále je pak možné využívat i ostatních příslušenství, která se vyskytují na běžných jízdních kolech. Může to být například helma. Velomobily sice nabízejí větší ochranu než jakékoli nekapotované jízdní kolo, nicméně dobrá helma zajistí kvalitní ochranu hlavy, která může vyčuhovat z některých typů velomobilů. [5] V současné době se vyvíjí chytré přilby se zpětnou kamerou, která přenáší obraz do všeho mobilního zařízení, které je možno uchytit na řídítkách [83]. Pro lepší komunikaci s ostatními účastníky provozu lze použít také klakson nebo zvonek. V neposlední řadě jsou používány držáky na pití nebo na telefon. [5]

3 NORMY POPISUJÍCÍ OBLAST VYUŽITÍ VELOMOBILU

V současné době nejsou velomobily rozšířeným dopravním prostředkem, a proto zatím neexistují žádné směrnice, či zákony, které by přesně definovaly pojem velomobil. Klasické velomobily, které nevyužívají elektrické podpory, patří do oblasti jízdních kol. Proto je nutné, aby se řídily normou **CEN/TC 333** [87], která normalizuje oblast jízdních kol, jejich součásti a příslušenství se zvláštním zřetelem na požadavky na bezpečnost, zkušební metody a terminologii.

Velomobily s elektrickým pohonem obecně spadají do kategorie elektrokol, která se řídí evropskou normou **ČSN EN 15194 (EPAC)** [88], která specifikuje, že elektromotor má disponovat maximálním výkonem 250 W, který se postupně snižuje a nakonec vypíná, jakmile vozidlo dosáhne rychlosti 25 km/h nebo pokud cyklista přestane šlapat. Norma také stanovuje, že není potřeba řidičského oprávnění, registrační značky nebo technického průkazu.

Pokud velomobily s elektrickým pohonem nespĺňují normu ČSN EN 15194, pak je nutné, aby se řídily nařízením Evropské unie **číslo 168/2013** [89] o schvalování dvoukolových nebo tříkolových vozidel a čtyřkolek a dozoru nad trhem s těmito vozidly. Na základě výkonu elektrického motoru, maximální rychlosti a počtu kol se velomobily dělí do následujících kategorií:

Tab.1 Kategorizace velomobilů podle různých kritérií

Kategorie	Podkategorie	Název	Počet kol	Maximální rychlost	Maximální výkon
L1e	L1e-A	motokola	2,3,4	25 km/h	1000 W
	L1e-B	dvoukolové mopedy	2	45 km/h	4000 W
L2e	L2e-P	Tříkolové mopedy	3	45 km/h	4000 W
L6e	L6e-A	Lehké silniční čtyřkolky	4	45 km/h	4000 W
	L6e-BP	Lehké užitkové quadrimobily	4	45 km/h	6000 W

V neposlední je nutné respektovat směrnici o strojních zařízeních **2006/42/EC** [90]. Tato evropská norma stanovuje základní požadavky na navrhování a výrobu strojních zařízení, jejichž cílem je zajistit jejich bezpečnost a ochranu zdraví uživatelů. Stroje splňující požadavky směrnice nesou označení CE.

4 MODERNÍ METODY PŘI VÝVOJI VELOMOBILŮ

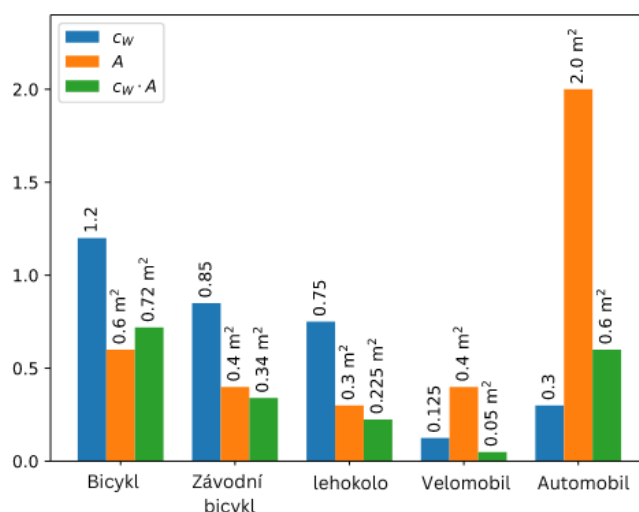
Vývoj velomobilů je procesem, který se stále zdokonaluje a zaměřuje se na jejich optimalizaci v mnoha různých oblastech. Nejedná se pouze o inovace v oblastech ekologie, bezpečnosti a mobility ve městech, ale také o vylepšení v oblasti rychlosti, výkonu a celkového dojezdu. Mezi klíčové faktory při vývoji velomobilů patří především dosažitelná aerodynamika a materiál nosné konstrukce či karoserie. Díky lepší aerodynamice, je možné dosahovat při stejném výkonu velomobilu a nižších aerodynamických odporů mnohem vyšších rychlostí, a dosáhnout tak vyšší efektivity využití výkonu velomobilu.

Využití moderních materiálů zase umožňuje dosažení již zmíněné redukce hmotnosti, taktéž adekvátní zvýšení konstrukční pevnosti nosné konstrukce, či karoserie.

Tato kapitola je zaměřena na vybrané přístupy, jež jsou běžně využívány při vývoji velomobilů a ovlivňují samotný design, výsledný výkon či celkový provozní komfort velomobilu. Vzhledem k nedostatku informačních zdrojů v souvislosti s velomobily, byly pro vypracování této kapitoly použity zdroje na základě podobnosti s dopravními prostředky, jejichž jednak konstrukční, či aerodynamické řešení vykazuje podobné prvky, jako v případě velomobilů. Jedná se tedy o automobily, v druhé řadě o závodní jízdní kola.

4.1 AERODYNAMIKA

Aerodynamika velomobilů je velmi důležitým faktorem při jejich vývoji. Aby byly velomobily co nejvíce aerodynamicky efektivní, hlavním cílem je tedy co nejvíce minimalizovat koeficient odporu vzduchu. Odpor vzduchu se totiž dominantně podílí na celkové odporové síle, která působí proti pohybu velomobilu. Má také vliv na maximální možnou rychlost, kterou se velomobily mohou pohybovat, proto hraje odpor obtékajícího vzduchu klíčovou roli. [91]



Obr. 27 Porovnání koeficientu odporu obtékajícího vzduchu, plochy průřezu a efektivní plochy průřezu [8]

Koeficient odporu vzduchu je u velomobilů v porovnání s klasickými jízdními koly velmi nízký. Na Obr. 27 je vidět, že například jízdní kola mají obvykle spíše špatnou aerodynamiku, která se projevuje mnohem vyšším koeficientem odporu vzduchu (C_w) ve

srovnání s automobily. Jediným důvodem proč následně celkový odpor není vyšší je ten, že plocha čelního průřezu jízdního kola (A) je obecně menší než u běžného automobilu. Oproti závodním kolům nebo lehokolům ovšem není plocha čelního průřezu velomobilu zase o tolik menší, ale aerodynamika velomobilu je mnohem lepší než u běžného automobilu. Z toho vyplývá, že efektivní plocha čelního průřezu ($c_W \cdot A$) je zde mnohem menší. [8]

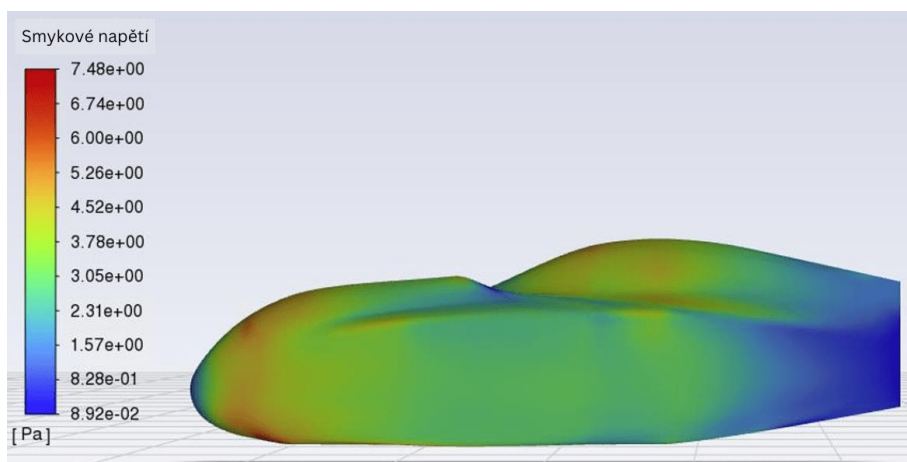
S dosažením lepších aerodynamických vlastností vozidla úzce souvisí především tvar karoserie. Karoserie jsou často navrhovány tak, aby minimalizovaly čelní plochu a zlepšily tok vzduchu kolem vozidla. Proto bývají obvykle kapkovitého tvaru. Přední část velomobilu je ovšem kulatá, což během jízdy způsobuje parciální nárůst tlaku vzduchu před velobilem, který následně odklání nahromaděný vzduch do strany. [8] Při jízdě ve velomobilu může obtékající vzduch výrazně narušit stabilitu vozidla a ohrozit tak bezpečnost provozu. Vítr totiž může působit v jakémkoli směru nežádoucími silovými účinky na karoserii velomobilu, což může vyústit v celkovou nestabilitu tohoto vozidla, vedoucí až k případnému převrácení velomobilu. [92]

Pro optimalizaci aerodynamiky velomobilů se běžně používají výpočetní nástroje umožňující provádění výpočetních simulací dynamického chování tekutin a to formou **CFD** (zkratka z anglického názvu Computational Fluid Dynamics). Jedná se o numerickou metodu, která slouží k simulaci proudění tekutin kolem pevných těles a lze ji tedy s výhodou využít pro simulaci procesu obtékání vzduchu kolem karoserie vozidla. Tato metoda pomáhá identifikovat veškeré silové interakce obtékajícího vzduchu působící na karoserii vozidla, a to jednak odporové síly vůči hlavnímu pohybu vozidla a vztahové síly působící na pohybující se vozidlo. [91] Tato numerická simulace prakticky poskytuje náhled na dopad konkrétního tvarového řešení karoserie velomobilu na aerodynamické účinky obtékaného vzduchu a poskytuje návod na eliminaci komplexních, či dílčích chyb tvarového provedení z aerodynamického pohledu. [93]

Aby byly parametry vozidla pro simulaci co nejpřesnější, využívá se pro importaci tvarového provedení velomobilu do virtuálního prostředí 3D skenování nebo počítačově vytvořeného 3D modelu. Při využití výpočetních nástrojů pro simulaci dynamiky proudění tekutin se u vozidel pohybujících se ve vysokých rychlostech většinou používá turbulentních modelů. CFD simulací lze využít pro širokou škálu různých charakterů proudění, z nichž lze vyčlenit dva základní typy proudění: laminární a turbulentní. Laminární proudění je velmi jednoduché a předvídatelné a při pokusu simulace tohoto charakteru proudění v reálném prostředí, zejména z pohledu obtékání karoserií pohybujících se vozidel, nebývá vzhledem k poměrně úzkému intervalu specifických parametrů k její aplikaci příliš prostor. Na druhou stranu popis turbulentního charakteru proudění je možné využít k simulaci mnohem širšího spektra reálných aplikací. Proudnic turbulentního proudění jsou zde oproti lineárnímu charakteru laminárního proudění chaotické a vznikají z nich víry, čímž se modelování stává složitějším než u laminárního proudění. [94] Pomocí CFD simulací můžeme pozorovat za velobilem tvořící se shluk turbulentních vírů v závislosti na tvaru karoserie. Tyto turbulentní víry tvoří velkou oblast vzduchu za vozidlem, která svým účinkem vytváří dílčí pole s nižším tlakem, které se následně snaží vozidlo táhnout zpět. [95]

Již z výše uvedeného vyplývá, že skořepina (karoserie) většiny klasických velomobilů má kapkovitý tvar. Pomocí simulace lze pozorovat například odtržení mezní vrstvy, k němuž dochází buďto ještě před odtokovou hranou nebo blíže k ní. Mezní vrstva je tvořena množstvím proudnic, jejichž rychlost se mění v závislosti na tření viskózního vzduchu o

povrch karoserie v určité vzdálenosti. Místo jejího odtržení závisí na charakteru proudění v mezní vrstvě a na její tloušťce v rámci turbulentního proudění. [96]



Obr. 28 Smykové napětí vznikající obtékáním vzduchem [96]

Ve studii [96] bylo primárním cílem navrhnout optimální karoserii velomobilu snížením aerodynamického odporu. Při výzkumu byly prováděny numerické simulace metodou CFD, které simulovaly působící proud vzduchu na model velomobilu při různých rychlostech proudění a pod různými úhly. Na Obr. 28 je možné vidět výsledky jedné z mnoha provedených simulací daného výzkumu, která se zaměřovala na smykové napětí tvořící se podél karoserie velomobilu. Z výsledků simulace je patrné, že zadní část velomobilu nevykazuje téměř žádné smykové napětí, což je pravděpodobně způsobeno zpomalením proudění vzduchu v této oblasti. To se projevuje oddělením mezní vrstvy, což zpomaluje vozidlo a brání překonání maximální rychlosti 100 km/h. Kromě toho je také možné zpozorovat, že se mezní vrstva odděluje těsně před čelním sklem a vytváří izolovanou zónu nulové rychlosti. Na přední se děje pravý opak, protože proudění se střetává přímo s kapotáží, přičemž je nuceno se rozdělit do různých směrů. Tím vzniká zóna, kde rychlost proudění dosahuje nulové hodnoty, což se nazývá bod stagnace.

Kromě simulací obtékání vzduchu kolem vozidla je možné využít i simulace sdílení tepla [93] v interiéru velomobilu a výpočtu požadované rychlosti proudění vzduchu k zajištění optimální ventilace uvnitř kabiny. Jelikož jezdec během šlapání vykonává sportovní aktivitu, generuje teplo, které musí být odvedeno. Ve variantě plně uzavřené karoserie velomobilu není k dispozici žádné automatické chlazení, proto je aplikace ventilačních otvorů a jejich dimenzování klíčovým požadavkem při konstrukci velomobilu. Výpočet celkové tepelné bilance ovlivňují také menší zdroje tepla, jako například světlomety, jejichž účinek by měl být rovněž zohledněn.

Nespornou výhodou CFD simulací je umožnění provedení daných výpočtů a následný zisk požadovaných výsledků proti klasickým ručním metodám výpočtů. Přesné nastavení těchto numerických simulací by mohlo částečně nahradit testování v aerodynamických tunelech a ušetřit tak velké množství nákladů na jejich provoz. [94]

Výsledky CFD simulací jsou běžně porovnávány s výsledky měření v **aerodynamických (větrných) tunelech**. Aerodynamické tunely jsou zařízení, která jsou schopna zajistit požadovaný charakter proudění vzduchu kolem obtékaného objektu.

Aerodynamické tunely se zpočátku používaly k testování letadel, ale později také pro pozemní vozidla a jiné mechanismy. Měření v aerodynamickém tunelu je možné provádět buďto na skutečných modelech nebo na modelech v určitém, většinou menším, měřítku. [97]

V zásadě se ve větrných tunelech dají měřit podobné parametry, jichž lze dosáhnout pomocí výpočetní dynamice tekutin, tzn. především odpor vzduchu, lze charakterizovat způsob obtékání vzduchu kolem vozidla nebo také definovat míru distribuce tlakových polí kolem obtékaných objektů. Velomobil lze testovat v klidovém stavu kdy vzduch proudí kolem něj. [97]



Obr. 29 Testování v otevřeném aerodynamickém tunelu [97]

Na Obr. 29 je zobrazen otevřený aerodynamický tunel, ve kterém je model karoserie velomobilu v měřítku 1:10 umístěn na kovové tyčce. Kovová tyč je spojena se siloměrem měřícím sílu a momenty ve třech osách a odpor kovové tyče byl odečten od celkového odporu modelu. Studie [97] se zaměřila na vývoj dvou optimálních aerodynamických kapotáží velomobilu pro každodenního použití a překonávání rychlostních rekordů. Při experimentu byly porovnány součinitele tlakového, třecího a celkového odporu hodnocených modelů. Výsledky měření v aerodynamickém tunelu byly porovnány s výsledky numerických simulací, přičemž získané hodnoty součinitele celkového odporu vzduchu z aerodynamického tunelu se lišily až o 20 %. Tato odchylka byla pravděpodobně způsobena méně vhodným použitím turbulentního modelu $k-\varepsilon$ při numerické simulaci. Zpřesnění výsledků numerické simulace by umožnil model turbulence SST, který přesněji zachycuje přechod mezní vrstvy z laminárního do turbulentního režimu až o 3 %.

Při testování velomobilu se vzduch obtékající kolem vozidla, konkrétně přední části karoserie, rozděluje na proud vzduchu tekoucí pod karoserií, nad karoserií a kolem karoserie. Vzduch procházející pod velobilem se běžně pohybuje relativně pomaleji a vyvíjí vyšší tlak. Ten vytváří vztakovou sílu, která působí proti tíze vozidla a snižuje tak valivý odpor, což umožňuje dosažení vyšší rychlosti a taktéž využití výkonu velomobilu s vyšší efektivitou. Proudění vzduchu kolem kol, tedy i v podběžích kol je navíc doprovázeno Bernoulliho efektem a sice, když se kola otáčejí, vytvářejí oblast vysokého a nízkého tlaku v důsledku zrychlování a zpomalování okolního vzduchu, což přispívá k celkovému odporu vozidla. [96] Proto je potřeba u velomobilů, jakožto sportovních vozidel, simulovat i vliv rotujících kol a jejich dopad na změnu charakteru proudění obtékajícího vzduchu. Pro zvýšení přesnosti dat

získaných z aerodynamického tunelu poskytují tunely možnost testování i na pohyblivém pásu nebo pomocí praktické simulace rotujících kol. Testování na pohyblivém pásu je nejlepším řešením ve smyslu dosažení požadované přesnosti měření. [97]

Pro zvýraznění vizualizace proudění vzduchu, které je zobrazeno na Obr. 30, se používají tzv. vizualizační podněty. Mezi nejčastěji používané podněty patří kouř nebo amorfni prášky s vizuálně zvýrazňujícím efektem, které pomáhají určit charakter obtékání, tedy laminární nebo turbulentní proudění. [98]



Obr. 30 Vizualizace proudění pomocí kouře [129]

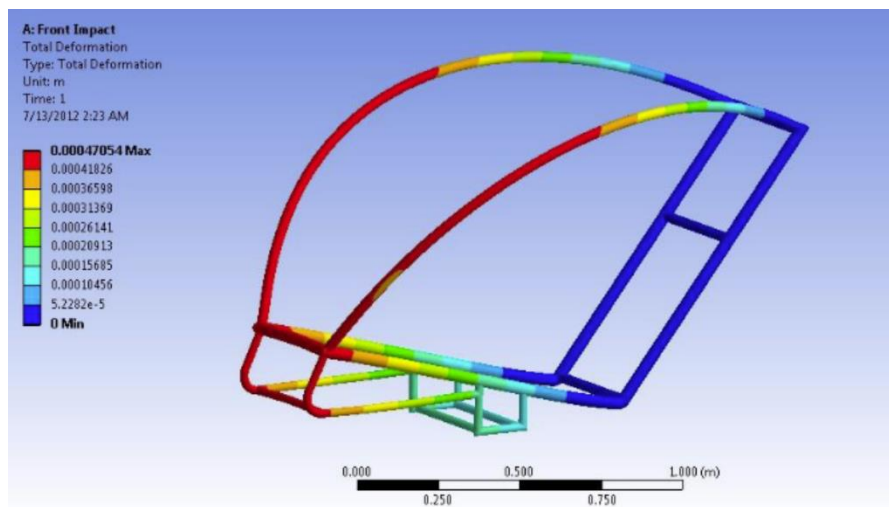
Nevýhodou aerodynamických tunelů je především jejich vysoká cena z pohledu investičních, a posléze i provozních nákladů. Proto si testování v aerodynamických tunelech nemohou dovolit v tomto kontextu všechny výrobní společnosti a využívají se tak i jiné metody pro testování velomobilů jako je například výše zmíněná simulace pomocí CFD. [94]

4.2 VYUŽITÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je numerickou metodou, pomocí které je možné teoreticky simulovat a předvídat chování různých součástí velomobilu za definovaných podmínek zatížení. Specialisté aplikující tuto metodu tak mohou identifikovat místa s negativním projevem jakéhokoli posuzovaného parametru, která lze následně optimalizovat a eliminovat tak kritická místa na minimální úroveň, aby byla zvýšena spolehlivost technického řešení velomobilu. MKP je velmi všestranný nástroj, který celý proces návrhu zjednodušuje. Používá se u systémů se složitými okrajovými podmínkami, systémů s nepravidelnou geometrií nebo systému s předvídatelnou závislostí těchto podmínek na čase. Bez tohoto simulačního nástroje by bylo náročné experimentálně replikovat a posuzovat veškeré dopady reálného silového působení na posuzovaný objekt, a to jak z pohledu finančních, tak zejména časových nároků. [99]

Metoda konečných prvků (MKP) lze využít k teoretické simulaci zatížení mnoha prvků velomobilu, jako jsou nosný rám, karoserie, zavěšení kol, brzdové systémy nebo pedály. Zajištění provozního komfortu a bezpečnosti jezdce je zásadním požadavkem při překonávání nerovných terénů. Jedním z klíčových prvků velomobilu pro testování odolnosti je nosný rám. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, rám je základním konstrukčním prvkem, na němž jsou

pevnostně navázány veškeré ostatní prvky. MKP analýza umožňuje teoreticky simulovat pomocí strukturální (statické) analýzy, jak se tento nosný rám dokáže vyrovnávat s různým zatížením, navíc působících z různých směrů. Tím je schopna stanovit, zda je rám dostatečně pevný a tuhý, aby byl aplikovatelný v běžných podmínkách svého provozu. Účelem (MKP) statické analýzy je získat rozložení napětí a posléze případné deformace v oblasti potenciálních kritických míst, což následně usnadňuje provedení odhadu únavy této konstrukce a posléze tak celkové životnosti. Předpovídá také, zda bude součást při namáhání náchylná k negativním dopadům běžného provozního zatížení, a to zejména k lomu, deformaci, únavě nebo celkovému opotřebení. Na základě výsledků simulace lze stanovit, zda je simulovaný subjekt bezpečný. [99]



Obr. 31 Deformace při čelním nárazu [100]

Obr. 31 představuje rám tříkolky, který byl testován metodou konečných prvků. Výzkum [100] byl zaměřen na simulaci čelního nárazu tříkolky za účelem identifikace napětí a deformací rámu, což poskytlo přehled o potenciálně slabých místech. Z výsledku simulace vyplývá, že největší deformace se vyskytly na přední části rámu, zatímco zadní část konstrukce zůstala teoreticky neporušená. To vede k úvaze o redistribuci materiálu v rámci přední části konstrukce a zesílení její odolnosti. Snížení deformací při nárazu by bylo možné například přidáním příčníku nebo také změnou geometrie rámu ve spodní části, kde docházelo ke koncentraci napětí. I když výsledky simulace naznačují, že je konstrukce bezpečná, optimalizace rámu za účelem zvýšení jeho odolnosti je pozitivním faktorem při možné kolizi dané tříkolky.

Jelikož je velomobil vybaven také systémem odpružení kol, který poskytuje řidiči jízdní komfort tlumením nárazů, umožňuje tato metoda konečných prvků tyto tlumící vlastnosti jednak analyzovat a posléze i zoptimalizovat. Díky této MKP simulaci lze vystavit systém zavěšení různým podmínkám zatížení, změnám různých materiálových vlastností a geometrickým změnám pro optimalizaci jejich funkce a výkonu. MKP analýza může sloužit také k celkové redukci hmotnosti komplexní konstrukce velomobilu využitím aplikace provozně vhodnějších, zejména lehčích materiálů s to při zachování požadované pevnosti, či s její pozitivní modifikací. Díky aplikaci těchto provozně vhodnějších materiálů lze posléze i optimalizovat finanční nároky spojené s výrobou velomobilu, či finanční nároky provozního charakteru spojené s adekvátní možností prodloužení servisní doby. [101]

MKP analýzu je možné aplikovat i na brzdové systémy velomobilů. Simulačním softwarem lze simulovat tepelná zatížení brzdových kotoučů během brždění. Teplo vznikající při brždění totiž může vést k přehřátí brzdového systému a snížit tak posléze jeho účinnost. Analýza za účelem specifikace teplotních profilů proto umožňuje zmapovat proces tepelné zátěže brzdového kotouče při působení teplot na jeho obě strany. Tímto je dosaženo přesnějšího popisu případných deformací brzdových kotoučů při aplikaci prudkého brždění. Na základě tohoto teoretického přístupu lze zkoumat aplikaci vhodných geometrických tvarů, či ve vzájemné součinnosti i aplikaci lehkých kompozitních materiálů. U těchto materiálů je důležité sledovat poměr pevnosti ku hmotnosti a analyzovat celkové teplotní poměry. [102]

Jednou z výhod metody konečných prvků je tzv. topologická optimalizace. Tato metoda zajišťuje navržení optimálního tvaru či geometrie daného prvku za účelem efektivní redukce hmotnosti nebo zvýšení pevnosti. Může se jednat například o aplikaci výztuh, které dodatečně poskytují možnost efektivního zvýšení tuhosti. Příkladem využití topologické optimalizace je u pedálu velomobilu. Pedál může být cyklicky zatížen pod různými úhly a následnou optimalizací geometrie lze dosáhnout snížení koncentrace napětí a redukce hmotnosti až o několik desítek procent. Snaha o maximální redukci hmotnosti konstrukce je tudíž primárním faktorem pro vývoj velomobilů. [103]

4.3 MULTI-BODY SIMULACE

Multibody simulace jsou jedním z mnoha klíčových nástrojů, které pomáhají při vývoji velomobilů. Tato konkrétní metoda je numerickou simulací, která umožňuje numericky modelovat a simulovat pohyb mezi mnoha vzájemně propojenými součástmi komplexních systémů. Simulace umožňují navrhovat, testovat a optimalizovat buďto celkové provozní chování vozidla, nebo pouze chování jeho jednotlivých součástí. Simulovaný systém je tvořen pevnými a pohyblivými tělesy. Multibody simulace nejsou používány pouze u velomobilů, ale slouží například k optimalizaci dynamických parametrů automobilů nebo jízdních kol. U velomobilů se simulace dynamiky soustavy více těles zaměřují především na přední a zadní zavěšení kol, geometrii kol, mechanismus řízení, brzdový systém a další. [104]

Dynamiku velomobilu je možné testovat za různých provozních podmínek. Díky simulaci můžeme vidět, jak se velomobil chová například při různých rychlostech a odlišných terénních podmínkách, především při průjezdu zatáčkami ve vysokých rychlostech. Při průjezdu zatáčkami ve vyšších rychlostech může ku příkladu dojít k překročení silového působení na velomobil a způsobit tak jeho převrácení. Multibody simulace zajišťují lepší bezpečnost provozu velomobilu pomocí analýzy těchto negativních silových dopadů na jeho převrácení. Tato zkouška může být klíčová pro optimalizaci stability a ovladatelnosti vozidla. Při optimalizaci stability hrají velkou roli rozměry vozidla, poloha těžiště, poloměr otáčení a jiné parametry. [105]

Dalším využitím je teoretická simulace průjezdu vozidla nerovným terénem, či simulaci akcelerujícího nebo brzdícího vozidla, což dává příslušným specialistům v oboru možnost zdokonalovat odpružení a zlepšit nastavení geometrie [106]. Simulace dynamiky soustavy více těles dokáže teoreticky simulovat vzájemnou silovou interakci mezi jednotlivými prvky v rámci celkově propojené mechanické soustavy. Specifikovat tak výslednou míru odpružení a optimalizovat využití dodávaného výkonu velomobilu. Tím se ve výsledku zvýší celkové provozní výhody velomobilu. [104]

Dalším aspektem provozu jsou akustické projevy velomobilu v důsledku jeho provozu. Snížení úrovně vibrací a hluku ve vozidle je zásadní pro pohodlí řidiče a celkovou bezpečnost jízdy. Pomocí simulace dynamiky více těles mohou příslušní odborníci v oboru identifikovat zdroje vibrací a zvuků vydávaných ze všech částí vozidla a určit nejlepší možná řešení, jak je eliminovat. [104]

Mezi výhody multibody simulací patří zejména rychlejší a efektivnější vývoj velomobilu, aniž by byla potřeba reálných prototypů. Další výhodou je snížení nákladů na testování v reálných podmínkách. Tento přístup umožňuje identifikaci potenciálních problémů v návrhu ještě před sestavením celého systému. Modelací složitých systémů jako celku se navíc předchází nepřesným výsledkům, ke kterým může dojít při lokálním nebo statickém zjednodušení. Velkou výhodou je i testování systémů v obtížně nahraditelných podmínkách prostředí. [104]

4.4 OPTIMALIZACE ELEKTROMOTORU

Vzhledem ke stále se zvyšující pozornosti směřované k využití elektrické asistence v dopravě především z ekologických důvodů je velký důraz kladen na optimalizaci běžně využívaných elektromotorů v konstrukci velomobilu. Aby elektromotory poskytovaly příslušné provozní výhody, je potřeba zajistit dodávaný výkon velomobilu a snížit spotřebu energie, čímž se zvýší samotný dojezd.

Prvním možností, pomocí které mohou být elektromotory optimalizovány je simulace magnetického toku. Pomocí simulačních softwarů využívají příslušní specialisté v oboru elektromagnetické analýzy k ověření výkonosti elektromotoru a také dalších parametrů. Při analýze magnetického toku je především zkoumána distribuce a hustota magnetického toku v motoru, čímž je následně dosaženo vyšší účinnosti motoru. Mezi další klíčové vlastnosti elektromotorů patří elektromagnetický točivý moment, jehož závislost na elektrickém stupni umožňuje analýza poskytnout v grafické formě. Využití elektromagnetické analýzy vyhodnotit také účinnost elektromotoru na základě ztrát, které jsou způsobeny vířivými proudy, hysterezními ztrátami a ztrátami souvisejícími s materiálem jádra. [107] Z analýzy elektromagnetického modelu lze také určit zpětnou elektromotorickou sílu motoru a fázové proudy, které tečou modelem motoru. Kromě výše zmíněných parametrů nabízí tato metoda vylepšení geometrie a celkově zvýšení efektivity provozu elektromotoru. [108]

Analýza magnetického toku elektromotoru bývá doprovázena tepelnou analýzou. Tepelné chování elektromotoru je z hlediska jeho prevence před přehřátím a pro zajištění bezpečného chodu důležitým faktorem. Tepelná analýza pomáhá identifikovat maximální teploty v konstrukci elektromotoru při jeho maximálním možném zatížení, kterému může být elektromotor vystaven. Předvídat tepelné ztráty a rozložení teploty při zátěži elektromotoru je nezbytné pro jeho plynulý chod. [109] Kromě numerické simulace tepelné analýzy lze experimentálně měřit teplotní změny během provozu elektromotoru. Na klíčová místa jsou aplikovány termální snímače, které teplotní změny zaznamenávají. [110] Volba vhodného materiálu elektromotoru může představovat taktéž důležitou roli pro výkon elektromotoru. Při vystavení vysokým teplotám materiály nakonec překročí svůj normální provozní rozsah, což způsobí fázovou změnu, změkčení, roztavení, degradaci a únavu materiálu. Například některé kovy vzácných zemin se při přehřátí demagnetizují, čímž je zkrácena životnost elektromotoru. [111] Navržením vhodného chladicího systému, ať už se jedná o přirozené chlazení nebo jiný

typ chlazení, můžeme snadno odvádět teplo produkované motorem. Zlepší se tím výkon, udržitelnost, účinnost točivého momentu a dalších parametrů, které jsou ovlivněny teplem produkovaným elektromotorem. [109]

Kromě simulací jsou elektromotory na základě vytvořeného prototypu experimentálně měřeny na dynamometrech. Dynamometr je zařízení, které se používá k testování výkonosti elektromotorů. Poskytuje informace o provozních limitech elektromotoru, na základě kterých mohou být posléze elektromotory optimalizovány. Snímá a analyzuje například velikost točivého momentu, rychlost otáčení motoru, napětí, proud a výkon, který elektromotor generuje při různých podmínkách a zatíženích. Informace o těchto experimentálně naměřených parametrech vyhodnotí v tzv. mapě účinnosti elektromotoru, která je charakterizována závislostí točivého momentu na otáčkách elektromotoru. Dynamometr také umožňuje vyhodnotit zpětnou elektromotorickou sílu motoru. Výhodou dynamometru je napodobit reálné podmínky provozu, čímž je dosaženo přesnějších výsledků, které mohou být následně porovnány s výsledky simulací. [107]

Mimo výše zmíněné aspekty je výkon elektromotorů do určité míry ovlivňován vibracemi. Vysoká úroveň vibrací elektromotoru způsobující hluk má velký vliv na komfort z jízdy. Hluk a vibrace jsou způsobeny kombinací buzení (elektromagnetických sil generovaných motorem) a přirozenou frekvencí konstrukce. [112] Vibrace v elektromotorech mohou být také způsobeny nevyvážeností rotoru, opotřebením ložisek, či jinými nedostatky. Kromě toho, že způsobená rezonance nepříznivě ovlivňuje ostatní systémy, opotřebovává tak díly a snižuje výkon pohonu elektromotoru. Z těchto důvodů je možné využít tzv. modálních analýz, které umožňují například identifikaci deformací statoru v závislosti na vlastních frekvencích. [113] Pro analytické posouzení, při jakých frekvencích pravděpodobně dosáhneme špičky akustické odezvy, slouží využití Campbellova diagramu. Tento diagram ukazuje dominantní budící frekvence jako diagonální čáry s lineárním vztahem mezi frekvencí a rychlostí otáček rotujícího zařízení. Špičky šumu se obvykle vyskytují tam, kde se čáry protínají. Analýzu spektra frekvencí naopak poskytuje spektrogram. Spektrogram ukazuje akustickou odezvu pro každý frekvenční řád. Tam, kde řád kmitočtů protíná vlastní frekvenci, je amplituda akustické odezvy neboli amplituda akustického výkonu maximální. Spektrogram prezentuje také intenzitu vibrací, která je reprezentována intenzitou barvy na spektrogramu. Tím je možné detekovat problémové oblasti a posléze je optimalizovat. [112]

DISKUZE

Velomobily představují efektivní a udržitelný způsob dopravy, nicméně proto, aby byly ve společnosti rozšířeny jako běžný dopravní prostředek, je třeba jejich větší propagace. Do povědomí lidí se totiž tento dopravní prostředek a jeho hlavních přednosti zatím nedostaly.

Vzhledem k současnému celosvětovému problému se znečištěným ovzduším vlivem spalování fosilních paliv velomobily reprezentují ekologický způsob dopravy, nicméně je tomu opravdu tak? Klasické velomobily využívající primárně lidskou sílu k pohonu jsou samozřejmě ekologické, avšak s technickým pokrokem u většiny současných moderních velomobilů můžeme v konstrukci nalézt elektromotor s baterií. Mnoho lidí si myslí, že náhrada elektromotorů za spalovací motory automaticky představuje ekologickou alternativu dopravy, ale problém dle mého názoru představuje výroba elektrické energie pro napájení těchto elektromotorů. Z více zdrojů jsem zjistil, že tepelné elektrárny vyrábějící elektřinu spalováním fosilních paliv představují velký problém pro kvalitu okolního ovzduší. Navíc samotná likvidace baterií může být nebezpečná pro životní prostředí vzhledem k obsahu škodlivých látek, pokud není odevzdána k ekologické likvidaci a recyklaci. Nicméně v porovnání s elektromobily mají velomobily nižší celkový ekologický dopad z pohledu výroby a likvidace baterií. Zmírnění problému shromažďování elektrické energie pro pohon elektromotoru umožňují velomobilům fotovoltaické panely. Využití fotovoltaických panelů je určitě skvělou alternativou zdroj energie, jenže mají také své limity z hlediska potřebného slunečního záření. Navíc ne každý uživatel by upřednostnil efektivitu před vzhledovou atraktivitou velomobilu.

Dalším problémem, který bych chtěl vyzdvihnout je cena velomobilu. Z průzkumu jsem zjistil, že během technologického pokroku přispěly k inovaci velomobilů moderní kompozitní materiály jako je kupříkladu karbon či kevlar. Využití těchto materiálů má sice mnoho výhod, jako je redukce celkové hmotnosti velomobilu, zvýšení pevnosti samotné konstrukce nebo optimalizace aerodynamických vlastností, přesto jsou poměrně drahé. Dle zdrojů jsou náklady na výrobu karoserie vyrobené z moderních materiálů poměrně vysoké. Navíc samotná oprava karoserie je náročnější v porovnání s rámovou konstrukcí. Budoucí výzkum by dle mého názoru měl spíše směřovat na náhradu těchto drahých materiálů za jiné materiály s podobnými vlastnostmi, čímž by poklesla pořizovací cena. Pokud by se mělo jednat o rozšíření velomobilů mezi běžné dopravní prostředky, tak drahá aerodynamická karoserie zase nehraje důležitou roli při pohybu v městské dopravě.

Při vývoji těchto moderních vozidel se využívá několik numerických, ale i praktických metod, které disponují určitými výhodami. Ačkoli numerické simulace pomáhají při optimalizaci velomobilů tím, že nahradí reálné jízdní podmínky, ne vždy se tyto podmínky podaří nahradit. Například ověřování správnosti výsledků simulací v aerodynamických tunelech je stále důležité, přesto je jejich provoz finančně velmi náročný. Přiblížení reality provozních podmínek velomobilu pomocí pohyblivých pásů, či praktické simulace rotujících kol nemusí být z mého pohledu také úplně levnou záležitostí. Proto si myslím, že numerické simulace jako je CFD mohou v blízké době stále více usnadňovat vývoj velomobilů, avšak ne úplně nahradit cenné výsledky z aerodynamických tunelů.

Objemnější rozměry velomobilu v porovnání s jízdními koly mohou rovněž znamenat problém z hlediska jejich parkování či uskladnění, a to zejména ve městech. Kromě toho dle mého názoru určitě nebude jednoduché přimět lidi zvyknout si na jiný typ dopravního prostředku, když jsou zvyklí po mnoho let využívat předností automobilů, či jízdních kol.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je věnována provedení rešerše v oblasti vývoje velomobilů. Velomobily jsou vozidla primárně poháněná lidskou silou, která jsou vybavena aerodynamickou karoserií představující základní ochranu řidiče před nepříznivým počasím. Velomobily reprezentují inovativní a udržitelný způsob dopravy nejen ve městech, ale i mimo něj. Vzhledem k absenci spalovacího motoru velomobily reprezentují ekologickou formu dopravy, čímž snižují negativní dopady na životní prostředí a závislost na fosilních palivech. Nejenže je velomobil méně nákladnou variantou na provoz oproti automobilům, ale pravidelnou fyzickou aktivitou významně přispívá k lepšímu fyzickému zdraví řidiče.

Cílem této práce bylo přiblížit toto novodobé téma vývoje velomobilů a provést komplexní analýzu a zhodnocení v oblasti rozdělení velomobilů, konstrukčního provedení a nastínění možných přístupů, které pomáhají inovovat současné velomobily.

Při průzkumu bylo zjištěno, že velomobily lze kategorizovat podle mnoha kritérií. Velomobily lze dělit nejen na základě konstrukčního provedení, jako je uspořádání kol, typ pohonu nebo zda je řidič chráněn plně uzavřenou karoserií, ale i podle účelu, s jakým bude velomobil využíván. Může se jednat o velomobily určené výhradně pro městské, závodní, turistické nebo nákladní účely, přičemž každý typ má na základě účelu jiné designové či konstrukční provedení. U jednotlivých kategorií byl kladen důraz na zhodnocení jejich předností, či nevýhod, a to jak z pohledu komfortu řidiče, tak z pohledu jízdních vlastností velomobilu.

Dalším významným aspektem je konstrukce velomobilu. Ta je zvláštní tím, že vychází z konstrukce lehokol a kombinuje prvky jízdních kol a automobilů. V této práci jsou podrobně analyzovány jednotlivé prvky konstrukce velomobilu a taktéž materiály, ze kterých jsou komponenty vyrobeny. Klíčovým aspektem pro velomobily je využití moderních kompozitních materiálů, jako jsou karbonová vlákna, která zvyšují poměr pevnosti ku hmotnosti. Redukce hmotnosti znamená nejen zlepšení aerodynamických vlastností, ale i výraznou pomoc při jízdě do kopců. Výrazné pomoci může být dostaveno taktéž díky integrovanému elektromotoru v konstrukci velomobilu. Elektromotory představují v současné době zásadní inovaci v dopravě. Proto je v kapitole o konstrukci věnována pozornost porovnávání používaných elektromotorů v konstrukci velomobilu.

Závěrečná část této práce se zabývá přiblížením vybraných přístupů při vývoji velomobilů. Na základě průzkumu jsou zde představeny jak numerické, tak i praktické metody, které pomáhají optimalizovat nejen aerodynamické vlastnosti velomobilu, ale i zvýšení pevnosti konstrukce velomobilu, či zvýšení výkonnosti elektromotoru. Numerické metody sice představují účinný nástroj pro vývoj velomobilů, nicméně testování v reálných podmínkách je stále jedním z klíčových aspektů při vývoji velomobilů.

Tato práce poskytuje základní přehled o velomobilech a současných trendech v jejich vývoji. Slouží taktéž k vyobrazení velomobilů, jako užitečného dopravního prostředku běžného dopravního systému. I když v dnešní době nejsou velomobily rozšířeným dopravním prostředkem a jejich výroba je poměrně drahá, jejich pořizovací cena se tak moc neliší ve srovnání s elektrokoly. Budoucí výzkum by se mohl zaměřit na možnosti postupné náhrady automobilů za velomobily. Přece jenom velomobily reprezentují ekologický způsob dopravy, tak proč je více nevyužívat?

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Velomobile*. Online. RECUMBENT.NEWS. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/category/the-recumbent-bike-gear/velomobiles/>. [cit. 2024-02-19].
- [2] *Velomobiles*. Online. Velocycle. 2020. Dostupné z: <https://www.velocycle.ie/velomobiles/>. [cit. 2024-02-07].
- [3] MCMAHON, Mary. *What is a Velomobile?* Online. In: Wikimotors.com. 17.1.2024. Dostupné z: <https://www.wikimotors.org/what-is-a-velomobile.htm>. [cit. 2024-02-08].
- [4] *Why to Cycle a Velomobile: Comfortable*. Online. Velomobile World. Dostupné z: <https://www.velomobileworld.com/why-to-cycle-a-velomobile-comfortable/>. [cit. 2024-02-07].
- [5] ROSSI, Katrina. *Everything you need to know about Velomobiles*. Online. In: Velosurance. 2022. Dostupné z: <https://velosurance.com/blog/everything-know-about-velomobiles/>. [cit. 2024-02-07].
- [6] *Velomobile Media Rolling advertisements Velomobile*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://www.velomobil.no/velomobile.htm?fbclid=IwAR0EPCBNNwcdn6wHLvzcvgfW_x58His5IX97NodKBZXUa0k5h4SQrXdrQPQ. [cit. 2024-02-08].
- [7] DE DECKER, Kris. *The Velomobile: High-tech Bike or Low-tech Car?* Online. LOW-TECH MAGAZINE. 2010. Dostupné z: <https://solar.lowtechmagazine.com/2010/09/the-velomobile-high-tech-bike-or-low-tech-car>. [cit. 2024-02-07].
- [8] MODER, Christoph a GRANT, Tony. *Velomobile Knowledge Base*. Online. Velomobile Knowledge Base. 2022. Dostupné z: https://anotherkiwi.gitlab.io/velomobil-grundwissen/velomobile_knowledge.html#why-are-there-usually-two-wheels-in-front-and-one-behind. [cit. 2024-02-07].
- [9] *Tadpole vs. Delta Trikes: Which is right for me?* Online. RAD Innovations. Dostupné z: <https://www.rad-innovations.com/compare-trikes.html>. [cit. 2024-02-08].
- [10] *TADPOLE AND DELTA TRIKES WITH FALCO EBIKE SYSTEM*. Online. In: Falco eMotors Inc. 2020. Dostupné z: <https://falcoedrive.com/blogs/news/tadpole-and-delta-trikes-with-falco-ebike-system>. [cit. 2024-02-08].
- [11] HORWITZ, Rickey. *The Recumbent Trike Design Primer*. Online. In: Hell-Bent Cycle Works. © 2010. Dostupné z: <https://ethicallogistics.org/Bikes/Recumbent%20Trike%20Design%20Primer.pdf?fbclid=IwAR229NaufRB1YcwFpr-lPc2pmmIlgO319Z6OJb6-H5a0--gvSXXKafasdQawM>. [cit. 2024-02-08].

2024-04-04].

- [1] Analysis of Looped Water Distribution Network with Different Head Loss Formula.
[2] Online. *Innternational Symposium on Aspects of Mechanical Engineering and Technology for Industry*. 2014, s. 1-404. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1011.4640>. [cit. 2024-02-16].
- [1] SORENSEN, Per Hassel. *VELOMOBILE: REDEFINED, Constructing a unique human*
[3] *powered vehicle with electric assist, to save you & the world*. Online, Diplomová práce. STAVANGER, NORWAY: Univerzita Stavanger, 2014. Dostupné z: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/219644>. [cit. 2024-02-20].
- [1] *Velomobil*. Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia
[4] Foundation, 2001. Dostupné také z: <https://www.wikiwand.com/en/Velomobile>.
- [1] KENNETH. *Velomobiles*. Online. *Velomobiles*. 2012. Dostupné z:
[5] <https://www.velomobiles.co.uk/tag/velayo/?fbclid=IwAR2bI1ZElnKkbQsrdeNSqODLULQK7usXaUfTBfJsoFtZjG78i-YOnPDEiCg>. [cit. 2024-02-12].
- [1] NAMASIVAYAM, Satesh; HOSSEINI FOULADI, Mohammad; AL-OBAIDI,
[6] Abdulkareem Sh. Mahdi; LUKE LAIMON, Alexander; SYAFIQ, Mohd. et al. Execution of the C-D-I-O framework at postgraduate level in mechanical engineering. Online. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2021, roč. 49, č. 2, s. 101-121. ISSN 0306-4190. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0306419019866514>. [cit. 2024-02-19].
- [1] KRIS DE DECKER. *LOW←TECH MAGAZINE*. Online. *LOW←TECH MAGAZINE*.
[7] 2012. Dostupné z: <https://solar.lowtechmagazine.com/2012/10/electric-velomobiles-as-fast-and-comfortable-as-automobiles-but-80-times-more-efficient/>. [cit. 2024-02-14].
- [1] COXWORTH, Ben. *ELF velomobile is powered by you and the Sun*. Online. *New Atlas*.
[8] 2012. Dostupné z: <https://newatlas.com/elf-pedal-solar-velomobile/25285/>. [cit. 2024-02-15].
- [1] NURSE, Stephen. Context and Methods for Improved Velomobiles. Online. *Australasian*
[9] *Transport Research Forum 2019 Proceedings*. 2019, s. 1-21. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335475197_Context_and_Methods_for_Improved_Velomobiles. [cit. 2024-02-15].
- [2] *Using Lifecycle Analysis (LCA) Towards Environmental and Human Health Footprints of*
[0] *Electrically Assisted Velomobile, PODBIKE*. Online, Diplomová práce. Faculty of Science and Technology University of Stavanger: University of Stavanger, 2020. Dostupné z: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2678611>. [cit. 2024-02-19].
- [2] *Solar Velomobile pedilio*. Online. VIEBACH, Thomas. *Pedilio*. Dostupné z:
[1] <https://www.pedilio.de/news-english/about-pedilio/>. [cit. 2024-02-19].
- [2] , Ron Johnson. *The velomobiles are coming but will they play a part in the future of e-*

- 2] *mobility?* Online. Momentummag. 2023. Dostupné z: <https://momentummag.com/the-velomobiles-are-coming-but-will-they-play-a-part-in-the-future-of-e-mobility/>. [cit. 2024-02-19].
- [2 RICHARDSON, Mark; BURNS, Karen a HAYLOCK, Brad. *PUUNK my ride: development of the Personalised User-generated Upcycled N-configurable Kit velomobile*. Online. Adelaide, Australia: ATRF 2011 - 34th Australian Transport Research Forum, 2014. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267829887_PUUNK_my_ride_development_of_the_Personalised_User-generated_Upcycled_N-configurable_Kit_velomobile#fullTextFileContent. [cit. 2024-03-29].
- [2 BAKKER, Robbert. *Mechanical design and prototyping of a four-wheeled velomobile concept*. Online, Master Thesis, vedoucí Ing. P. van Passel, Ir. M.P.J. Zwart. Dronten, June 2016. Dostupné z: <https://robbertbakker.com/verslag%20final.pdf>. [cit. 2024-03-15].
- [2 ADY. *2 Seater Velomobile / Velomobil 2 Sitzer*. Online. In: Velomobile World. Dostupné z: <https://www.velomobileworld.com/2-seater-velomobile-velomobil-2-sitzer/>. [cit. 2024-05-22].
- [2 *VELOMOBILE: BREVETS, SPORT COMPETITIONS AND RECORD RIDES VEHICLE*. Online. VELOMOBILE WORLD. Dostupné z: <https://www.velomobileworld.com/brevets-sport-competitions-record-rides/>. [cit. 2024-02-20].
- [2 MORSE, Lonnie. *Streamliners vs Velomobiles*. Online. Recumbent Aerodynamics Blog. 7] 2010. Dostupné z: <https://lonniemorse.wordpress.com/2010/10/25/streamliners-and-velomobiles/>. [cit. 2024-02-19].
- [2 *VeloOne CARGO 2.0 velomobile*. Online. Veloone - Multi Purpose Velomobile. Dostupné z: <https://veloone.eu/veloone-cargo-2-velomobile/>. [cit. 2024-03-29].
- [2 BLEVIS, Eli. *SUSTAINBLY OURSMellow velo*. Online. *Interactions*. 2009, roč. 16, č. 9] 1, s. 48-51. ISSN 1072-5520. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/1456202.1456215>. [cit. 2024-04-04].
- [3 *We've evolved the bike, not the rider*. Online. Bicycle Evolution. Dostupné z: <https://www.bicycle-evolution.com/index.php/new-home-page/velomobiles-2/>. [cit. 2024-03-13].
- [3 JAMES, Karen. *What Are Velomobiles? An Introductory Guide to Pedal-Powered Speedsters*. Online. In: Momentum Mag. 2024. Dostupné z: <https://momentummag.com/what-are-velomobiles-an-introductory-guide-to-pedal-powered-speedsters/>. [cit. 2024-03-13].
- [3 TEAM, Carbiketech. *What Is Monocoque Construction In Vehicles?* Online. In: CarBikeTech. 2020. Dostupné z: <https://carbiketech.com/monocoque-unibody/>. [cit. 2024-

03-13].

- [3] MARKUS, Frank. *Body-on-Frame vs. Unibody vs. Monocoque: What's the Difference?*
3] Online. In: MotorTrend. 2020. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/body-on-frame-vs-unibody-vs-monocoque-what-is-the-difference/>. [cit. 2024-03-13].
- [3] NELSON, John. *What Is The Advantage Of Body On Frame Construction?* Online. In:
4] Four Wheel Trends. 2021. Dostupné z: <https://fourwheeltrends.com/what-is-the-advantage-of-body-on-frame-construction/>. [cit. 2024-03-13].
- [3] *Meet Podbike® FRIKAR™ e-bike*. Online. Podbike. ©2024. Dostupné z:
5] <https://www.podbike.com/>. [cit. 2024-03-14].
- [3] TWIKE-TEAM. *TWIKE 5 – frame*. Online. In: TWIKE. Apr 11,2022. Dostupné z:
6] <https://twike.com/en/twike-5-frame/>. [cit. 2024-05-18].
- [3] VITTOURIS, Alexander a RICHARDSON, Mark. Designing for Velomobile
7] Diversity:Alternative opportunities forsustainable personal mobility. In: *7th International Velomobile Seminar Programme*. Dronton, The Netherlands, 2012, s. 1-36.
- [3] *CompositesLab*. Online. CompositesLab. 2024. Dostupné z:
8] <https://compositeslab.com/composites-compared/composites-vs-steel/index.html>. [cit. 2024-03-13].
- [3] WRITER, Staff. *Composite Materials: Purpose, History, Uses, and Characteristics*.
9] Online. In: Nenalezený vydavatel. 2024. Dostupné z:
<https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/what-are-composites/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] MAXIME. *Carbon Fiber or Steel: Which is the Best Choice?* Online. In: ICC. 2023.
0] Dostupné z: <https://ic-composite.com/en/carbon-fiber-or-steel-which-is-the-best-choice/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] *Carbon Fiber vs Steel: What's the Difference?* Online. In: NitPro Composites. 2023.
1] Dostupné z: <https://www.nitprocomposites.com/blog/is-carbon-fiber-stronger-than-steel>. [cit. 2024-03-13].
- [4] COMPOSITES, Spartec. *Carbon Fiber vs Kevlar®, Which is Better?* Online. In: Spartec
2] Composites. 2022. Dostupné z: <https://www.sparteccomposites.com/2022/06/23/carbon-fiber-vs-kevlar-which-is-better/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] SATHISHKUMAR, TP; SATHEESHKUMAR, S a NAVEEN, J. Glass fiber-reinforced
3] polymer composites – a review. Online. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2014, roč. 33, č. 13, s. 1258-1275. ISSN 0731-6844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>. [cit. 2024-04-04].
- [4] *ELF Solo*. Online. Organic Transit. Dostupné z: <https://organictransit.com/product/elf->

- 4] solo/. [cit. 2024-03-13].
- [4] *ABS vs. PET*. Online. Nenalezený vydavatel. 2009, 08.09.2018. Dostupné z:
5] <https://www.makeitfrom.com/compare/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene-ABS/Polyethylene-Terephthalate-PET-PETE>. [cit. 2024-03-13].
- [4] *We design solar bio-hybrid vehicles for the everyday commute*. Online. In: Evovelo. 2014 -
6] 2024 ©. Dostupné z: <https://www.evovelo.com/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] GALLA, Honza. *Plywood velomobile from Slovakia – The Carcle Bike*. Online. In:
7] Recumbent.news. 2020. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/07/26/plywood-velomobile-from-slovakia-the-carcle-bike/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] PEREZ, Frank F. *Is Plywood Recyclable? Find Out the Reason*. Online. In: The Tools
8] Mag. 2022. Dostupné z: <https://thetoolsmag.com/is-plywood-recyclable/>. [cit. 2024-03-13].
- [4] *Understanding the Principles and Comparison of Mid-Drive Motor and Hub Motor in E-*
9] *bikes*. Online. In: RANDRIDE. 2024. Dostupné z:
<https://randridebikes.com/blogs/knowledge/understanding-principles-comparison-of-e-bikes-mid-drive-motor-and-hub-motor>. [cit. 2024-03-13].
- [5] HUNG, Nguyen Ba a LIM, Ocktaeck. A review of history, development, design and
0] research of electric bicycles. Online. *Applied Energy*. 2020, roč. 260, s. 1-18. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>. [cit. 2024-03-24].
- [5] FRIEDMAN, Zachary. *Geared Hub Motor Vs Direct Drive Hub Motor Ebike: Differences*
1] *and Pros and Cons*. Online. In: Where The Road Forks. 2024. Dostupné z:
<https://wheretheroadforks.com/geared-hub-motor-vs-direct-drive-hub-motor-ebike/>. [cit. 2024-03-13].
- [5] MICAH. *Geared Hub Motors Vs Gearless Hub Motors*. Online. In: Nenalezený
2] vydavatel. Dostupné z: <https://www.ebikeschool.com/geared-hub-motors-vs-gearless-hub-motors/>. [cit. 2024-03-13].
- [5] GALLA, Honza. *Alligt gives Bike2's pedal generator a new life*. Online. In:
3] Recumbent.news. Jan 31, 2023. Dostupné z:
<https://www.recumbent.news/2023/01/31/alligt-gives-bike2s-pedal-generator-a-new-life/>. [cit. 2024-03-14].
- [5] LEE, Kyuhyun a SENNER, Ipek Nese. E-bikes Toward Inclusive Mobility: A Literature
4] Review of Perceptions, Concerns, and Barriers. Online. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2023, roč. 22, s. 1-10. ISSN 25901982. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100940>. [cit. 2024-03-28].
- [5] CONTÒ, Chiara a BIANCHI, Nicola. E-Bike Motor Drive: A Review of Configurations and Capabilities. Online. *Energies*. 2023, roč. 16, č. 1, s. 1-34. ISSN 1996-1073.

- 5] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16010160>. [cit. 2024-03-24].
- [5 DIOUF, Boucar a PODE, Ramchandra. Potential of lithium-ion batteries in renewable
6] energy. Online. *Renewable Energy*. 2015, roč. 76, s. 375-380. ISSN 09601481. Dostupné
z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.058>. [cit. 2024-03-24].
- [5 WAW. Online. Katanga s.r.o. 2012. Dostupné z: <https://www.katanga.eu/waw/>. [cit. 2024-
7] 03-11].
- [5 *ICE RECUMBENT TRIKE GEARING OPTIONS*. Online. ICE RECUMBENT TRIKES.
8] © 2023. Dostupné z: <https://www.icetrikes.co/tech/gearing>. [cit. 2024-05-01].
- [5 DIMITROV, Vladimir. Overview of the Ways to Design an Electric Bicycle. In: *2018 IX*
9] *National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*. Sofia, Bulgaria:
IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-1-5386-5801-7. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA.2018.8439456>.
- [6 ROCKWOOD, D.; PARKS, N. a GARMIRE, D. A continuously variable transmission for
0] efficient urban transportation. Online. *Sustainable Materials and Technologies*. 2014, roč.
1-2, s. 36-41. ISSN 22149937. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.002>.
[cit. 2024-05-01].
- [6 WOHLFEIL, Florian. Radical Technological Innovation: Case Study of the P1.18 Bicycle
1] Transmission by Pinion. Online. *Technologický institut v Karlsruhe (KIT)*. 2015, s. 1-27.
ISSN 2194-1629. Dostupné z:
[https://www.researchgate.net/publication/283308748_Radical_Technological_Innovation
_Case_Study_of_the_P118_Bicycle_Transmission_by_Pinion](https://www.researchgate.net/publication/283308748_Radical_Technological_Innovation_Case_Study_of_the_P118_Bicycle_Transmission_by_Pinion). [cit. 2024-05-01].
- [6 PIANCASTELLI, Luca; FRIZZIERO, Leonardo a DONNICI, Giampiero. Study and
2] optimization of an innovative CVT concept for bikes. *ARN Journal of Engineering and*
Applied Sciences. 2014, roč. VOL.9, č. 8, s. 1289-1296. ISSN 1819 - 6608.
- [6 GALLA, Honza. *OSS (ASS) vs. USS vs. OC on an SWB recumbent*. Online. In:
3] *Recumbent.news*. Jul 2,2020. Dostupné z: [https://www.recumbent.news/2020/07/02/oss-
ass-vs-uss-vs-oc-on-an-swb-recumbent/](https://www.recumbent.news/2020/07/02/oss-ass-vs-uss-vs-oc-on-an-swb-recumbent/). [cit. 2024-03-13].
- [6 TWIKE-TEAM. *A round thing even without a steering wheel – TWIKE 5 presents*
4] *optimized steering system*. Online. In: TWIKE. Nov 6,2023. Dostupné z:
[https://twike.com/en/a-round-thing-even-without-a-steering-wheel-twike-5-presents-
optimized-steering-system/](https://twike.com/en/a-round-thing-even-without-a-steering-wheel-twike-5-presents-optimized-steering-system/). [cit. 2024-03-13].
- [6 MOCCIA, Luigi. *HOW TO STEER FRIKAR EBIKE!*. Online. In: *Podbike*. Dostupné z:
5] <https://www.podbike.com/how-to-steer/>. [cit. 2024-03-13].
- [6 *TWIKE 3 EQUIPMENT*. Online. TWIKE. Dostupné z: [https://twike.com/en/twike3-
6\] equipment/](https://twike.com/en/twike3-equipment/). [cit. 2024-03-11].
- [6 HONG, Keum-Shik; JEON, Dong-Seop; YOO, Wan-Suk; SUNWOO, Hyun; SHIN,

- 7] Sang-Yoon et al. A New Model and an Optimal Pole-Placement Control of the Macpherson Suspension System. Online. *SAE transactions*. 1999, roč. 108, s. 2452-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/1999-01-1331>. [cit. 2024-04-04].
- [6 LU, Wen; LI, Wenbo; CHEN, Xinbo a ABDELKAREEM, Mohamed A. A. Design
8] Optimization of an Integrated E-Type Multilink Suspension Wheel-Side Drive System and Improvement of Vehicle Ride Comfort. Online. *Shock and Vibration*. 2021, roč. 2021, s. 1-19. ISSN 1875-9203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2021/1462980>. [cit. 2024-04-04].
- [6 *Multi-Link Suspension System*. Online. In: UAE's leading autos blog | dubizzle Cars. ©
9] 2024. Dostupné z: <https://www.dubizzle.com/blog/cars/multi-link-suspension/>. [cit. 2024-03-14].
- [7 GALLA, Honza. *Everything you want to know about the Northern Light Motors 428*
0] *velomobile*. Online. In: Recumbent.news. Jun 1,2020. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/06/01/everything-you-want-to-know-about-the-northern-light-motors-428-velomobile/>. [cit. 2024-03-14].
- [7 ERIC, Riddles. *Pros and Cons of Air, Leaf, and Coil Spring Suspensions*. Online. In:
1] Custom Complete Automotive. July 13,2022. Dostupné z: <https://www.customcompleteautomotive.com/blog/pros-and-cons-of-air-leaf-and-coil-spring-suspensions>. [cit. 2024-03-14].
- [7 *ELECTROM: IS THIS THE ULTIMATE URBAN RECUMBENT?* Online. In: Recumbent
2] News. 2020. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/10/05/electrom-is-this-the-ultimate-urban-recumbent/>. [cit. 2024-03-29].
- [7 *Your Recumbent with Suspension Offers Comfort and Safety*. Online. HP Velotechnik. ©
3] 1993-2024. Dostupné z: <https://www.hpvelotechnik.com/en/recumbent-trikes-bikes/recumbent-tech-talk/tech-talk-your-recumbent-with-suspension-offers-comfort-and-safety/>. [cit. 2024-03-15].
- [7 METAR, Manas. Structural Analysis of Double-Wishbone Suspension System. Online.
4] *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021, roč. 9, č. 12, s. 1681-1685. ISSN 23219653. Dostupné z: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39602>. [cit. 2024-04-04].
- [7 THOMAS. *Advantages And Disadvantages Of Double Wishbone Suspension* . Online. In:
5] Suspension List. October 31,2022. Dostupné z: <https://suspensionlist.com/advantages-and-disadvantages-of-double-wishbone-suspension/>. [cit. 2024-03-15].
- [7 TWIKE-TEAM. *The brains behind the TWIKE 5: Driving dynamics expert Dr. Axel*
6] *Pauly*. Online. In: TWIKE. Nov 27,2022. Dostupné z: <https://twike.com/en/the-brains-behind-the-twike-5-driving-dynamics-expert-dr-axel-pauly/>. [cit. 2024-04-04].
- [7 *ICE RECUMBENT TRIKES*. Online. © 2023. Dostupné z: <https://www.icetrikes.co/>. [cit.

- 7] 2024-04-04].
- [7 NOVOCIC, Relja. *Drum brake (& roller brake) pros and cons*. Online. In: BikeGremlin.
8] 2024. Dostupné z: <https://bike.bikegremlin.com/15501/drum-brake-pros-and-cons/>. [cit. 2024-04-04].
- [7 SMITH, Chris. *The differences between hydraulic and mechanical disc brakes*. Online. In:
9] BIKE TEST REVIEWS. August 9,2023. Dostupné z: <https://biketestreviews.com/mechanical-vs-hydraulic/>. [cit. 2024-04-04].
- [8 MAIER, Oliver; GYÖRFI, Benedikt; WREDE, Jürgen; ARNOLD, Timo a MOIA,
0] Alessandro. In-depth analysis of bicycle hydraulic disc brakes. Online. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017, roč. 95, s. 310-323. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.044>. [cit. 2024-03-28].
- [8 MUKHERJEE, Dipanjan. Effect of Pavement Conditions on Rolling Resistance. Online.
1] *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2014, roč. Volume-3, č. Issue-7, s. 141-148. ISSN 2320-0847. Dostupné z: <https://www.academia.edu>. [cit. 2024-04-04].
- [8 *Recumbent Seats by HP Velotechnik Take a Seat and Adjust for Maximum Comfort*.
2] Online. HP Velotechnik. © 1993-2024. Dostupné z: <https://www.hpvelotechnik.com/en/recumbent-trikes-bikes/recumbent-tech-talk/recumbent-seats/>. [cit. 2024-04-04].
- [8 *Recumbent News*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/>. [cit. 2024-04-3] 04].
- [8 JAMES, Karen. *What Are Velomobiles? An Introductory Guide to Pedal-Powered*
4] *Speedsters*. Online. In: Momentummag. 2024. Dostupné z: <https://momentummag.com/what-are-velomobiles-an-introductory-guide-to-pedal-powered-speedsters/>. [cit. 2024-03-11].
- [8 *Bülk Technical | Mirrors*. Online. Velomobile World. Dostupné z:
5] <https://www.velomobileworld.com/technical-support/bulk-technical/bulk-technical-mirrors/>. [cit. 2024-05-23].
- [8
6] VEEMO BY ENVO. Online. Dostupné z: <https://veemo.ca/>. [cit. 2024-05-24].
- [8
7] CEN/TC 333, *Cycles*. 2007.
- [8 ČSN EN 15194, *Jízdní kola - Jízdní kola s pomocným elektrickým pohonem - Jízdní kola*
8] EPAC. 2017.
- [8
9] 168/2013, NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) o schvalování dvoukolových nebo tříkolových vozidel a čtyřkolek a dozoru nad trhem s těmito vozidly.

- 2013.
- [9 2006/42/EC, *Směrnice o strojních zařízeních, směrnice Evropského parlamentu a Rady*.
0] 3rd edition. 2006.
- [9 SHAKEEL, Syed Saadat; ABBAS, Khurram a SHAFI, Imran. Designing Efficient
1] Commuter Vehicle using Finite Element Analysis And Computational Fluid Dynamics.
In: *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*
(IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2019, s. 137-142. ISBN 978-1-5386-7729-2.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2019.8667122>.
- [9 RASMUSSEN, Carl Georg. Velomobile aerodynamics – side wind effect and operation
2] limits. In: *Proceedings of the 6th European Seminar on Velomobile Design*. Copenhagen,
2009, s. 1-8. Dostupné také z: [http://liggecykelforeningen.dk/wp-
content/uploads/vmse6-rasmussen-velomobile-aerodynamics.pdf](http://liggecykelforeningen.dk/wp-content/uploads/vmse6-rasmussen-velomobile-aerodynamics.pdf).
- [9 *Cool, Compact and Comfortable: Podbike FRIKAR Redefines the Velomobile*. Online. In:
3] ANSYS. 2021. Dostupné z: [https://www.ansys.com/blog/podbike-frikar-redefines-
velomobile](https://www.ansys.com/blog/podbike-frikar-redefines-velomobile). [cit. 2024-05-23].
- [9 DOVAL, Peter Nicholas. *Aerodynamic Analysis and Drag Coefficient Evaluation of*
4] *Time-Trial Bicycle Riders*. Thesis. Milwaukee: University of Wisconsin-Milwaukee,
2012.
- [9 MOFFAT, Jason. *Aerodynamic Vehicle Design and Analysis*. Thesis, vedoucí Wayne
5] Gater. School of Engineering, Blackpool and the Fylde College, 2016.
- [9 TORRENS, Aarón Ramón. *ANALYSIS AND DESIGN OF A HUMAN POWERED*
6] *VEHICLE*. Grado en Ingeniería Mecánica. VALÈNCIA: UNIVERSITAT
POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, 2023.
- [9 LAIMON, A. L.; NAMASIVAYAM, S. N. a HOSSEINI FOULADI, M. The
7] Development of an Optimal Aerodynamic Design for a Human Powered Vehicle. Online.
Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering.
2019, roč. 43, č. S1, s. 797-807. ISSN 2228-6187. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1007/s40997-018-0196-3>. [cit. 2024-05-23].
- [9 LUNAWAT, Prashant. *Why Do Cars Undergo Wind Tunnel Testing?* Online. In: Science
8] ABC. 2022. Dostupné z: [https://www.scienceabc.com/eyeopeners/why-do-cars-undergo-
wind-tunnel-testing.html](https://www.scienceabc.com/eyeopeners/why-do-cars-undergo-wind-tunnel-testing.html). [cit. 2024-05-23].
- [9 OZCAN, Ferhat a ERSOY, Sezgin. Analysis of the vehicle: applying finite element
9] method of 3D data. Online. *Mathematical Models in Engineering*. 2021, roč. 7, č. 4, s. 63-
69. ISSN 2351-5279. Dostupné z: <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22328>. [cit. 2024-
05-23].
- [1
00] GULATI, Vikas; KASHYAP, Ankur; PAWAR, Kartik a MEHTA, Er. Sameer. Design

-] and FEA of a recumbent trike. 2012, č. 7, s. 1648-1653.
- [1 DESIGN AND ANALYSIS OF SUSPENSION SYSTEM FOR A THREE WHEELER
01 ELECTRIC VEHICLE. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control*
] *Systems*. 2017, roč. 9., č. Sp– 14, s. 1230-1234.
- [1 Design Analysis of Bicycle Brake Disc for Carbon Fibre - Lightweight Material. Online.
02 *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING*. 2019, roč. 11, č. 8, s.
] 91-109. ISSN 2229-838X. Dostupné z:
<https://sure.sunderland.ac.uk/id/eprint/11396/3/Design%20Analysis%20of%20Bicycle%20Brake%20Disc%20for%20Carbon%20Fibre%20.pdf>. [cit. 2024-05-23].
- [1 ISMAIL, Ahmad Yusuf; NA, Gangta a KOO, Bonyong. Topology and Response Surface
03 Optimization of a Bicycle Crank Arm with Multiple Load Cases. Online. *Applied*
] *Sciences*. 2020, roč. 10, č. 6. ISSN 2076-3417. Dostupné z:
<https://doi.org/10.3390/app10062201>. [cit. 2024-05-23].
- [1
04 *Multibody Dynamics: All Together Now*. Online. In: ANSYS. 2023. Dostupné z:
] <https://www.ansys.com/blog/what-is-multibody-dynamics>. [cit. 2024-05-23].
- [1 NURPRASETIO, Ignatius Pulung; WIDYANTARA, Robby Dwianto; BUDIMAN,
05 Bentang Arief; LESTALUHU, Rakshidatu; DJAMARI, Djati Wibowo et al. Electric Delta
] Trike Stability Characteristic and Maneuverability Analysis: Experiment and Multi-Body
Dynamic Simulation. Online. *Automotive Experiences*. 2022, roč. 5, č. 3, s. 389-401.
ISSN 2615-6636. Dostupné z: <https://doi.org/10.31603/ae.7070>. [cit. 2024-05-23].
- [1 ÖZDEMİR, Refik Ahmet. *Politecnico di Torino - Department of Mechanical and*
06 *Aerospace – Team Policumbent*. Online. Hexagon. ©2024. Dostupné z:
] <https://hexagon.com/it/resources/resource-library/student-stories-case-studies/attivita-svolte-con-il-politecnico-di-torino/simulating-vehicle-dynamics-three-wheeled-velomobile>. [cit. 2024-05-24].
- [1 YANG, Yee-Pien a JIANG, Jia-Ming. Optimal Design of an Axial-Flux Permanent-
07 Magnet Middle Motor Integrated in a Cycloidal Reducer for a Pedal Electric Cycle.
] Online. *Energies*. 2015, roč. 8, č. 12, s. 14151-14167. ISSN 1996-1073. Dostupné z:
<https://doi.org/10.3390/en81212421>. [cit. 2024-05-23].
- [1 CHAWRASIA, Sandeep Kumar; DAS, Aakash a KUMAR CHANDA, Chandan. Design
08 and Analysis of Electric bike Hub-Motor using Motor-CAD. Online. *2020 3rd*
] *International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy*
Technologies. 2021, s. 1-6. ISBN 978-1-6654-2536-0. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1109/ICEPE50861.2021.9404475>. [cit. 2024-05-23].
- [1
09 RAJA, Selvakumar; NANDAGOPAL, Sasikumar; MUTHIYA, S Jenoris; R, Sathish
] Kumar; R. S PHD, Nakandhrakumar et al. Thermal Analysis of an Electric Motor in an
Electric Vehicle. In: *WCX SAE World Congress Experience*. 2023, s. 1-8. Dostupné z:

<https://doi.org/10.4271/2023-01-0532>.

- [1 CONTÒ, Chiara a BIANCHI, Nicola. A Guideline for Selecting Motors for Electric Bikes
10 Based on Magnetic Analysis and Measurements. Online. *IEEE Transactions on Energy*
] *Conversion*. 2024, roč. 39, č. 1, s. 97-106. ISSN 0885-8969. Dostupné z:
<https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3297844>. [cit. 2024-05-23].
- [1 *Keeping it Cool: Thermal Management Solutions for Electric Traction Motors*. Online. In:
11 ANSYS. 2023. Dostupné z: [https://www.ansys.com/en-gb/blog/thermal-management-](https://www.ansys.com/en-gb/blog/thermal-management-solutions-electric-traction-motors)
] [solutions-electric-traction-motors](https://www.ansys.com/en-gb/blog/thermal-management-solutions-electric-traction-motors). [cit. 2024-05-24].
- [1
12 *How to Design a Quiet Motor*. Online. ANSYS. 2023. Dostupné z:
] <https://www.ansys.com/en-gb/blog/how-to-design-a-quiet-motor>. [cit. 2024-05-23].
- [1 LEE, Young-Geun; BANG, Tae-Kyoung; LEE, Jeong-In; WOO, Jong-Hyeon; JO, Sung-
13 Tae et al. Characteristic Analysis and Experimental Verification of Electromagnetic and
] Vibration/Noise Aspects of Fractional-Slot Concentrated Winding IPMSMs of e-Bike.
Online. *Energies*. 2022, roč. 15, č. 1, s. 1-15. ISSN 1996-1073. Dostupné z:
<https://doi.org/10.3390/en15010238>. [cit. 2024-05-23].
- [1 *Northern Light Motors Introduces New Three-Wheeled Velomobile Platform*. Online. In:
14 INSIDEEVs. 2022. Dostupné z: [https://insideevs.com/news/600147/northern-light-three-](https://insideevs.com/news/600147/northern-light-three-wheel-velomobile/)
] [wheel-velomobile/](https://insideevs.com/news/600147/northern-light-three-wheel-velomobile/). [cit. 2024-05-22].
- [1
15 *TWIKE Velomobile: a Look Inside the Best*. Online. In: TWIKE Blog. 2017. Dostupné z:
] <https://blog.twike.com/twike-velomobile-a-look-inside-the-best/>. [cit. 2024-05-22].
- [1 *Podbike Frikar Covered Four-Wheeled E-Bike*. Online. In: Tip Bandit. 2023. Dostupné z:
16 <https://tipbandit.com/technology/podbike-frikar-covered-four-wheeled-e-bike/>. [cit. 2024-
] 05-22].
- [1 KATRIN. *TWIKE 3 in gutem Zustand zu verkaufen*. Online. In: Elektroauto Forum. 2018.
17 Dostupné z: [https://elektroauto-forum.de/beitrag/twike-3-in-gutem-zustand-zu-](https://elektroauto-forum.de/beitrag/twike-3-in-gutem-zustand-zu-verkaufen.464644/)
] [verkaufen.464644/](https://elektroauto-forum.de/beitrag/twike-3-in-gutem-zustand-zu-verkaufen.464644/). [cit. 2024-05-22].
- [1
18 FRIEDLANDER, David. *Meet the Car Killing ELF*. Online. In: LifeEdited. 2014.
] Dostupné z: <https://lifeedited.com/meet-the-car-killing-elf/>. [cit. 2024-05-22].
- [1 MARINHO, Luana. *Solar Powered Velomobile by Alve Henricson*. Online. In:
19 SUNBEAMsystem. 2020. Dostupné z: [https://www.sunbeamsystem.com/solar-powered-](https://www.sunbeamsystem.com/solar-powered-velomobile-by-alve-henricson/)
] [velomobile-by-alve-henricson/](https://www.sunbeamsystem.com/solar-powered-velomobile-by-alve-henricson/). [cit. 2024-05-22].
- [1 WELMERS, Bastiaan. *DuoQuest*. Online. In: DuoQuest. © 2000-2024. Dostupné z:
20 <https://en.velomobiel.nl/duoquest/>. [cit. 2024-05-22].

]

[1 VM Aerodynamik: Warum 2 Räder vorne und 1 hinten? Online. In: Velomobil-Forum.
21 2008. Dostupné z:
] <https://www.velomobilforum.de/forum/index.php?threads/aerodynamik-warum-2-raeder-vorne-und-1-hinten.17113/>. [cit. 2024-05-22].

[1 Scorpion fs20. Online. In: Trike-Shop. Dostupné z: <https://trike-shop.be/trikes/hpvelotechnik-trikes/scorpion-fs20-1>. [cit. 2024-05-22].
22]

[1 Bülk: The Velomobile that can change your life. Online. In: Velomobile World. Dostupné z:
23] <https://www.velomobileworld.com/bulk/>. [cit. 2024-05-22].

[1 Northern Light 428, el velomóvil que permite a los ciclistas generar y almacenar
24 electricidad mientras pedalean. Online. In: EcoInventos. 2022. Dostupné z:
] <https://ecoinventos.com/northern-light-428/>. [cit. 2024-05-23].

[1 Alpha 7 Technical / Front suspension. Online. In: Velomobile World. Dostupné z:
25] <https://www.velomobileworld.com/technical-support/alpha-7-technical/alpha-7-front-suspension/>. [cit. 2024-05-23].

[1 Start der Bestellung von Fahrwerksteilen. Online. In: TWIKE Blog. 2023. Dostupné z:
26] <https://blog.twike.com/start-der-bestellung-von-fahrwerksteilen/>. [cit. 2024-05-23].

[1 Bülk Technical. Online. In: Velomobile World. Dostupné z:
27] <https://www.velomobileworld.com/technical-support/bulk-technical/>. [cit. 2024-05-23].

[1 GALLA, Honza. The VELOMTEK VT1 Canadian velomobile update . Online. In:
28 Recumbent.news. 2023. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2023/11/20/the-velomtek-vt1-canadian-velomobile-update/>. [cit. 2024-05-23].

[1 LONNIE MORSE. Faired or un-faired. Online. In: Recumbent Aerodynamics Blog.
29 2013. Dostupné z: <https://lonniemorse.wordpress.com/2013/03/13/faired-or-un-faired/>.
] [cit. 2024-05-24].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene

CFD Computational Fluid Dynamics

FRP Fibre Reinforced Plastic

MKP Metoda konečných prvků

OSS Overseat steering (nadsedadlové řízení)

PET Polyethylentereftalát

USS Underseat steering (podsedadlové řízení)