



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH HNACÍHO ÚSTROJÍ ELEKTRICKY POHÁNĚNÉHO LONGBOARDU

ELECTRIC LONGBOARD POWERTRAIN DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Libor Pliešovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Fojtášek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Libor Pliešovský
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Fojtásek, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Návrh hnacího ústrojí elektricky poháněného longboardu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rozvojem technologie elektrických pohonů a baterií se velmi rozvíjejí také elektricky poháněné alternativní dopravní prostředky, mezi které patří i longboardy. Hnací ústrojí longboardů a jeho regulace však musí splňovat poměrně náročné požadavky na dynamiku pohybu, aby v žádném okamžiku nedošlo ke ztrátě rovnováhy jezdce a zároveň bylo dosaženo potřebného zrychlení. Stále se také zvyšuje efektivita těchto hnacích ústrojí a využití energie z baterií, které vede k delšímu dojezdu na jedno nabití.

Cíle diplomové práce:

Tato práce se bude zabývat návrhem efektivního hnacího ústrojí elektrického lonboardu. Hlavním cílem práce je sestavit elektricky poháněný longboard, který bude konkurenceschopný a uplatnitelný na trhu. Práce bude obsahovat:

- Rešerši elektricky poháněných longboardů včetně popisu uspořádání hnacích ústrojí a celkových parametrů.
- Vlastní návrh pohonu (baterie, motor, převody).
- Získání vstupů pro sestavení parametrického dynamického modelu.
- Sestavení modelu podélné dynamiky jízdy a ladění parametrů pohonu.

Seznam doporučené literatury:

HAYES, J. G. a GOODARZI, G. A. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. USA: Wiley, 2018. ISBN 978-111-9063-643.

BLUNDELL, M. a HARTY, D. Multibody systems approach to vehicle dynamics. England: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 07-506-5112-1.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hnacího ústrojí elektricky poháněného longboardu pro každodenní dojíždění. První část se zabývá rešerší elektrických longboardů a výběrem koncepce pohonu. Druhá část práce obsahuje konstrukční návrh celé sestavy se zaměřením na hnací ústrojí. Poslední část je věnována podélné dynamice jízdy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický longboard, hnací ústrojí, BLDC motor, akumulátor, datalogger, podélná dynamika jízdy

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of electric longboard drivetrain for commuting. The first part deals with the recherche of electric longboards and drivetrain concept selection. The second part contains the design of the whole assembly with focus on the drivetrain. The last part is devoted to the longitudinal driving dynamics.

KEYWORDS

Electric longboard, Drivetrain, BLDC motor, Battery, Datalogger, Longitudinal driving dynamics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Pliešovský, L. *Návrh hnacího ústrojí elektricky poháněného longboardu*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 96 s. Vedoucí diplomové práce Jan Fojtášek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20. května 2022

.....

Libor Pliešovský

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Janovi Fojtáškoví Ph.D za jeho čas, cenné rady a odborné vedení práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Jetsurf za umožnění a odbornou pomoc s měřením.

Nakonec bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za psychickou podporu při tvoření práce, a Romanovi Klišovi za pomoc s výrobou.

OBSAH

Úvod	11
1 Rešerše	12
1.1 Klasické longboardy	12
1.1.1 Deska	13
1.1.2 Trucky	15
1.1.3 Kola	18
1.2 Elektrické longboardy	19
1.2.1 Boosted	20
1.2.2 Inboard	22
1.2.3 Evolve skateboards	24
1.2.4 Mellow board	26
1.2.5 Exway	27
1.2.6 Jetsurf	29
1.2.7 Další výrobci	30
1.3 Další vývoj elektrických longboardů	31
1.4 Zhodnocení	32
2 Celková koncepce.....	35
2.1 Analýza hmotnosti	37
3 Návrh desky	38
3.1 Materiál desky	39
3.2 Výroba desky	39
4 Návrh akumulátoru	41
4.1 Výběr akumulátorových článků	41
4.2 Návrh krytu akumulátoru	44
4.3 Výroba akumulátoru	46
5 Návrh regulátoru	48
5.1 Výběr regulátoru	49
5.2 Návrh krytu regulátoru	50
6 Návrh hnacího ústrojí.....	52
6.1 Výběr elektromotoru	53
6.1.1 Vlastní datalogger	55
6.1.2 Měření charakteristik motorů	59
6.2 Výpočet převodového poměru	65
6.3 Návrh řemene	68
6.4 Návrh držáku a unašeče	69
6.4.1 Výroba obráběných dílů	73
6.5 Sestava hnacího ústrojí	74
7 Model podélné dynamiky.....	75
7.1 Analytický výpočet zrychlení	75
7.1.1 Odpor valivý	75
7.1.2 Aerodynamický odpor	75

7.1.3	Odpor stoupání.....	76
7.1.4	Odpor zrychlení.....	77
7.1.5	Celkový jízdní odpor	78
7.2	Měření zrychlení	80
7.3	Diskuse.....	82
Závěr		84
Seznam použitých zkratk a symbolů		92
Seznam příloh.....		96

ÚVOD

Tato práce se bude zabývat použitím elektricky poháněného longboardu jako dopravního prostředku tzv. poslední míle. Motivací pro toto téma mi bylo několikaleté dojíždění za studiem do Brna. Postupně to vyústilo v potřebu prostředku na kratší vzdálenosti, který by bylo možné si bez problému vzít do MHD i učebny. V současné době se tento trh stále rozrůstá o nové možnosti, od elektrických koloběžek, přes různé jednokolové balanční prostředky až po elektrické longboardy. Jejich výhody a nevýhody si popíšeme v následujících kapitolách.

1 REŠERŠE

Tato kapitola má za cíl popis klasických longboardů a jejich komponent a dále pak longboardů s elektrickým pohonem. Výstupem této kapitoly je zhodnocení jednotlivých řešení pohonu.

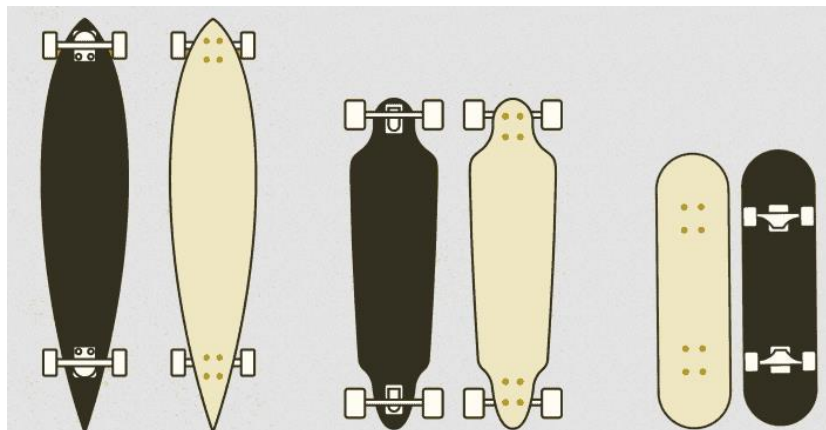
1.1 KLASICKÉ LONGBOARDY

Nejdříve je třeba vysvětlit co je považováno za longboard a rozdíl proti mnohem známějším skateboardům.

Historie skateboardu sahá až do 50. let 20. století a je spjata s Amerikou, konkrétně státem Kalifornia [1]. Zde první jezdci vyráběli desky z prken z dřevěných beden, která doplnili o kolečka z kolečkových bruslí. Tehdy šlo hlavně o doplněk k oblíbenému surfingu. Postupně ho firmy začali vyrábět a vznikl ikonický tvar jaký známe dnes, tedy klasicky 7vrstvá deska z kanadského javoru, se zvednutými konci na obou stranách, king-pin trucky (pojem je vysvětlen dále v kapitole 1.1.2) a malými polyuretanovými kolečky. Skateboard je primárně určen pro jízdu na velmi hladkém povrchu, nejčastěji skateparky, parkoviště atd., kde na něm jezdci zkouší různé triky a skoky. V roce 2020 se tento sport dokonce zařadil mezi olympijské disciplíny, se dvěma hlavními kategoriemi park (bowl) a street. V obou s cílem co nejvíce zaujmout odbornou porotu.

Zásadní rozdíl longboardu oproti skateboardu je ten, že longboard je určen hlavně k přepravě a celkově rychlejší jízdě. Je pro to mnohem víc uzpůsoben, díky tomu na něm ale naopak nejdou tolik dělat triky (na Obr. 1 jsou srovnány skateboard i 2 různé longboardy). Místa kam longboard nejvíce patří jsou různé parky, chodníky a cyklostezky kde je možné se pohodlně a rychle dopravovat.

Pro tento účel je zvětšená deska, ta na délku měří od 80 cm do přibližně 115 cm. Trucky (tedy nápravy) už nejsou king-pin ale nejčastěji reverse king-pin (dále vysvětleno v kapitole 1.1.2). A průměr koleček se zvedl od nějakých 70 mm až do 100 mm. Pro žádné z parametrů nejsou přesně dány hranice, ale rozdíl je hlavně v účelu longboardů a skateboardů. Oba ale mají desku, 2 zatáčecí nápravy (trucky) a 4 kolečka. V longboardingu se také dá závodit, disciplíny se ale hodně liší. Asi nejznámější je jízda z kopce, tzv. downhill. Rychlostní rekord z roku 2017 atakuje rychlost 150 km/h [2].

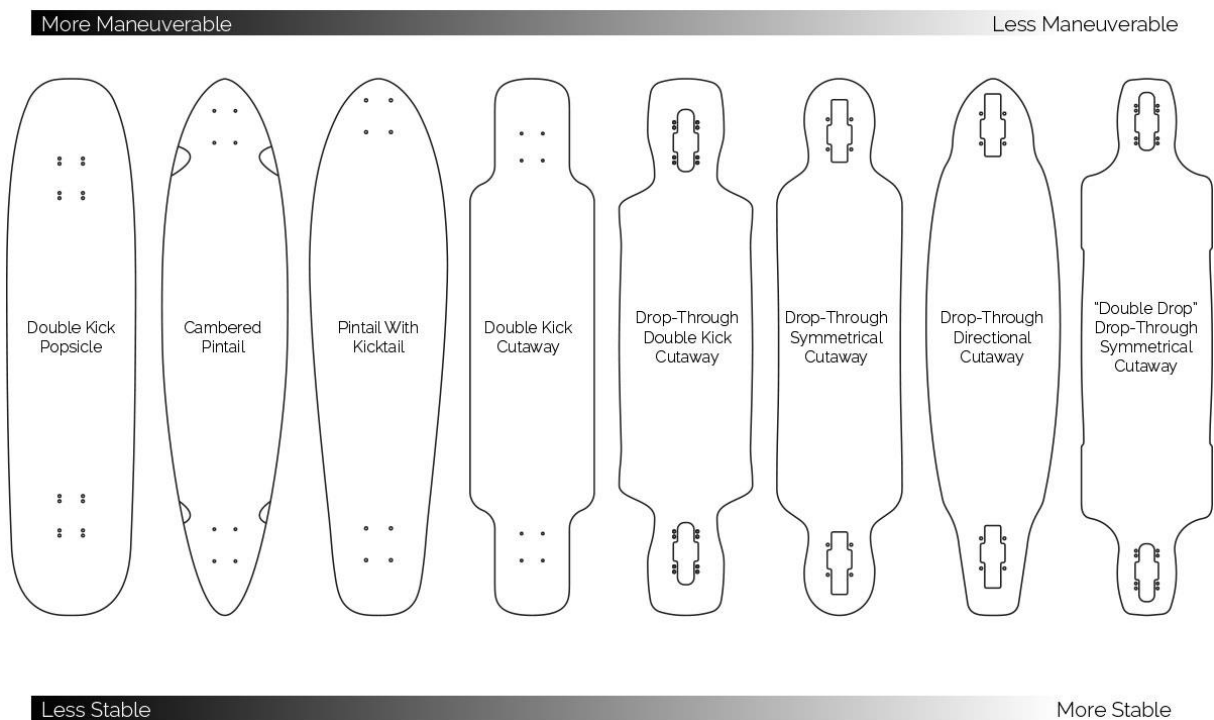


Obr. 1 Vlevo a uprostřed longboard a napravo klasický skateboard [3]

1.1.1 DESKA

Longboardové desky se podle svého účelu liší hlavně ve svých tvarech. Obecně jsou děleny na 4 základní typy a to cruiser, downhill, freeride a freestyle. Jednotlivé tvary můžeme vidět na Obr. 2, zde jsou zástupci hlavně kategorií cruiser a freeride. Asi nejstarší tvar je druhý zleva, tedy pintail, ten zároveň i nejvíce připomíná surfové prkno.

Co se týče materiálu, stále zde přetrvává použití dřeva nad umělými hmotami a lamináty. Je to hlavně kvůli tlumení vibrací a menší výrobní náročnosti. Většina desek se proto skládá z tenkých dých dřeva, obvykle 7 až 9, která jsou lisována ve formě do určeného tvaru. Poté jsou slepena k sobě a vzniká tak materiál velmi podobný překližce. Z druhů dřev se používá nejčastěji kanadský javor a poslední vrstva s grafikou bývá z bambusu. Samozřejmě ale existují i alternativní materiály, např. desky Pennyboardů jsou z plastu. U některých značek je možné vidět snahu o vložení kompozitních materiálů, mezi jednotlivé vrstvy je vkládáno skelné vlákno, popř. se potahuje už hotové prkno.



Obr. 2 Výběr z tvarů longboardových desek [4]

Desky se ale můžou lišit i tvarem z profilu. Kromě klasické koncepce, kdy jezdec stojí na téměř rovné desce a trucky jsou namontovány pod ní (klasický skateboard) jsou rozlišovány i desky drop-throw a drop-deck. Koncepce drop-throw i drop-deck se snaží zajistit jezdcovi co nejnižší možné těžiště, každá to ale zajišťuje jinak. U drop-throw desky (Obr. 4) jsou totiž trucky montovány z vrchu, tím se výška desky sníží o tloušťku desky a tloušťku styčné části hangeru (více kapitola 1.1.2). Samozřejmě tím pádem musí být v desce výřezy, aby bylo možné takto trucky namontovat. Drop-deck deska (Obr. 3) má trucky montovány klasicky zesponu, ale tvar desky je v prostřední části prohnut dolů tak, aby v části, kde jezdec stojí měl co nejmenší vzdálenost od země (a těžiště).



Obr. 3 Drop-deck longboard [5]



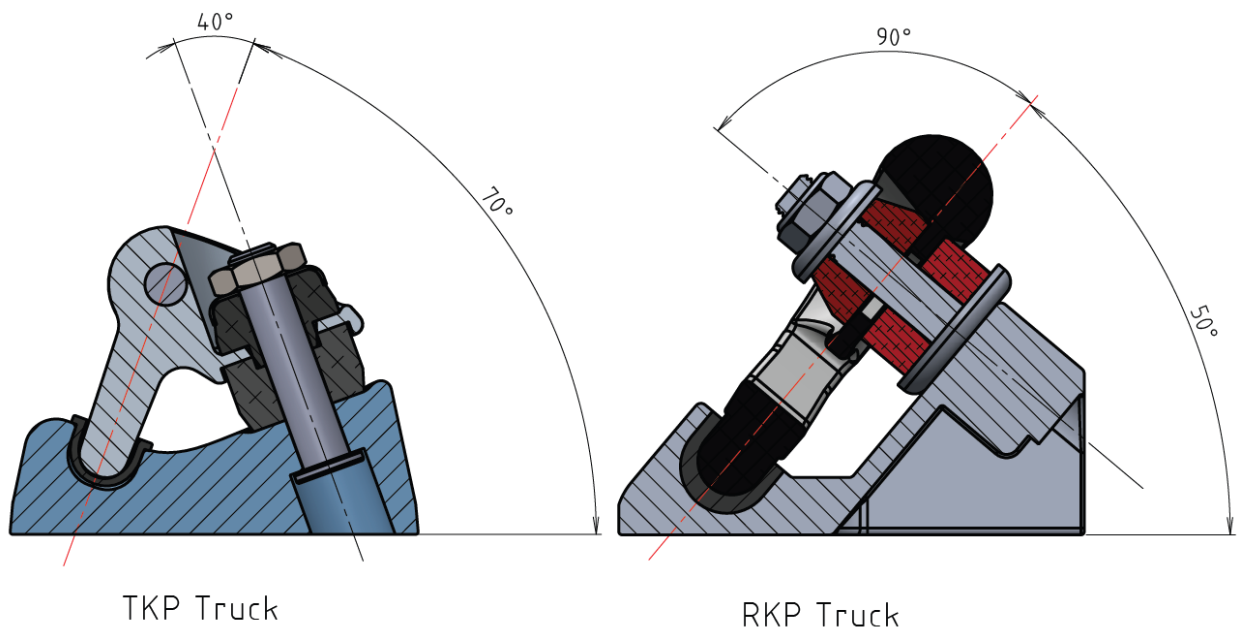
Obr. 4 Drop-throw longboard [5]

Dalším a posledním tvarem který můžeme u desek sledovat je jejich prohnutí v příčném směru (tzv. konkáva). Zde záleží na preferenci každého jezdce, nejčastěji můžeme vidět desky s prohnutím obyčejného U nebo W.

Dalším významným parametrem je pružnost desky. Vyloženě tuhé desky se používají pro vyšší rychlosti. Jezdci jsou hodnocené jako více předvídatelné ale při průjezdu po nerovnostech jsou méně komfortní, protože jednoduše tolik netlumí. Oproti tomu desky pružné fungují jako tlumič a podobně jako v autě se starají o odpružení části s posádkou (jezdcem), zatímco neodpružená kola přejíždí po nerovnostech. Používají se pro nižší rychlosti, protože mají větší tendenci k „rozviklání jezdce“ (tzv. speed wobble). To je jev kdy při určité rychlosti dochází ke ztrátě stability v důsledku nekontrolovaného rozkmitání desky. Může být způsoben nejen nevhodnou deskou ale i příliš povolenými trucky, špatným rozložením hmotnosti atd.

1.1.2 TRUCKY

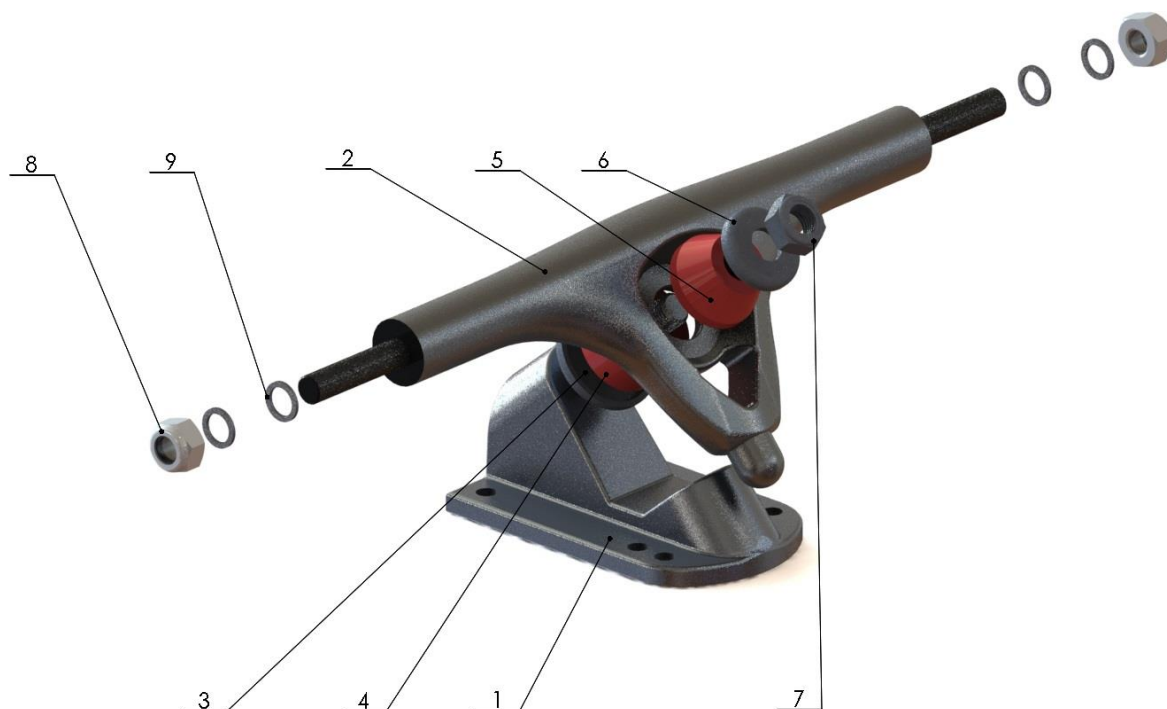
Nápravy se u longboardů nazývají trucky a na rozdíl od většiny vozidel bývají obě zatáčecí. Existuje mnoho druhů těchto náprav, u longboardů jsou nejvíce zaběhlé Reverse Kingpin (dále jen RKP) trucky. Na obr. 5 můžeme vidět rozdíl mezi RKP a Traditional Kingpin (dále TKP), které jsou používány u skateboardů. Oba typy obsahují podobné součásti, které se liší tvarově. Když pomineme rozchod, který bývá u TKP nejčastěji přibližně 150 mm a RKP 180 mm, liší se zejména úhly mezi hlavními osami. Osa otáčení je u obou označena červeně. Sklon této osy od základny určuje, zda bude vhodný spíše pro větší rychlosti ale zároveň menší rádiusy zatočení a naopak. Sklon červené osy od černé zase určuje, jak velký bude účinek tlumících silentbloků (tzv. bushingů). U TKP trucků tedy vidíme že úhly jsou navrženy tak aby s nimi šlo co nejlépe zatáčet bez většího odporu bushingů. U RKP trucků je to přesně naopak, kvůli větším rychlostem je požadována větší stabilita a tuhost sestavy, za cenu větších minimálních rádiusů zatočení.



Obr. 5 Geometrie Traditional King Pin (TKP) a Reverse King Pin (RKP) trucků

Reverse Kingpin

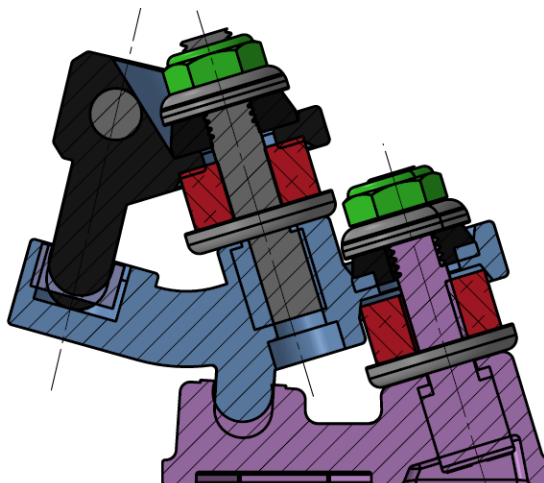
Nejdříve je nutné říct z čeho se RKP trucky skládají, což můžeme vidět na Obr. 6. Hlavními částmi jsou baseplate (pozice 1), který je přímo přišroubován k desce a dále hanger (pozice 2), kterým prochází hřídel obou koleček s ložisky. Hanger se vůči baseplatu při zatáčení hýbe, aby to bylo možné je oboustranně uložen mezi bushingy (pryžové válcové nebo kuželové elementy podobné silentblokům) a ze stran doplněn o podložky a dotažen maticí (pozice 3,4,5,6 a 7).



Obr. 6 Složení RKP trucku1; 1 - baseplate, 2 - hanger, 3 - dolní podložka, 4 - dolní bushing, 5 - horní bushing, 6 - horní podložka, 7 - matice baseplatu, 8 - matice kolečka, 9 - speedingring

Doble King Pin

Další variantou používanou hlavně na elektrických longboardech jsou na Obr. 7 Double Kingpin trucky (dále jen DKP). Při bližším pohledu na jejich geometrii je možné si všimnout, že jde o složení dvou TKP trucků dohromady. Kolečka jsou uložena na TKP hangeru s větším rozchodem podobným nebo i větším než RKP, tedy 180-235 mm. Pod ním je upravený baseplate, který navazuje na odsazený druhý stupeň bushingů a dále už baseplate připevněný k desce. Výhody takového řešení jsou hlavně menší minimální poloměr zatočení a jemná odezva, teoreticky lepší tlumení vibrací a větší světlá výška. Poslední jmenovaná může být i nevýhoda ale v oblasti elektrických longboardů je větší světlá výška spíše přínosem. Co se týče nevýhod tak tím, že celá sestava má menší tuhost díky použití dvou sad bushingů, není to příliš vhodné řešení pro vyšší rychlosti. Tento dojem je ale velmi subjektivní a výrobci se snaží tento jev snížit např. i větším rozchodem.



Obr. 7 Geometrie Double Kingpin trucků

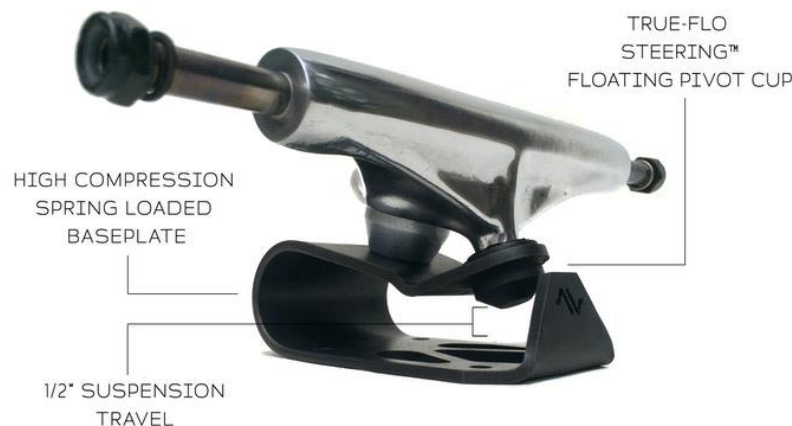
Ostatní

Před vznikem výše popsaných variant skateboardových a longboardových trucků vzniklo spoustu jiných geometrií, některé i se čtyřmi koly na nápravu a podobně. V poslední době byly uvedeny dvě další varianty, které stojí za povšimnutí. Prvním z nich je výrobce LeanBoards pocházející z Kalifornie, který navrhl zatáčecí nápravy využívající náklon koleček (Obr. 8). Síla odezvy není řízena pryžovými bushingy, ale přímo tlačnou pružinou. Tím je možné ji plynule seřizovat a sám výrobce udává i lineárnější odezvu oproti klasické koncepci. Dále je zde možné i přes použití velkých kol o průměru 100 mm zachovat nízké těžiště. Nevýhodou je že tyto trucky nemají standartní rozteč děr pro připevnění k desce, ale hlavně je nutné použití koleček přímo od výrobce. Při použití standartních silničních koleček s rovnou styčnou plochou nebudou fungovat.



Obr. 8 Leanboard při zatáčení [6]

Dalším zajímavým nápadem zaujala firma Avenue Trucks v roce 2015 (Obr. 9), taktéž na síti Kickstarter. Snažila se vyřešit problém s tlumením TKP trucků, tedy trucky určené pro skateboards. Vyvinula baseplate z pružinového plechu, který nejen že tlumí namáhání kloubů při dopadech v rámci skateboardových triků, ale navíc dokáže pomoci i při výskoku. Výrobce dále uvádí spoustu dalších výhod jako menší náchylnost k tzv. „spedd wobble“ nebo hladší zatáčení [7]. Dnes existuje i větší verze určená pro longboards. Nevýhodou je hlavně vyšší cena.



Obr. 9 Avenue Suspension Trucks [7]

1.1.3 KOLA

U kol je sledováno několik hlavních parametrů, jsou to hlavně: vnější průměr, šířka, tvrdost směsi, tvar styčné plochy a další. Vnější průměr je nejvíc určujícím parametrem pro použití na skateboard či longboard. Zatímco skateboardová kolečka mají průměr přibližně od 50 mm po 70 mm, longboardová od 70 mm až po 100 mm. Zde se bude nejvíce lišit, zda se jedná o elektrický longboard nebo klasický. Speciálně u elektrických longboardů mohou průměry dosahovat i 120 mm až 165 mm. Dále se vyrábí už jen vzduchem plněná pneumatická kola, která u klasických longboardů vůbec nenajdeme. Na Obr. 10 můžeme vidět klasického zástupce longboardových kol od výrobce ABEC 11 s průměrem 97 mm. Skládá se z plastového středu (oranžová část) kolem kterého je polyuretanové tělo (zelená část). Název výrobce vychází z normy pro ložiska, které se zde používají. Právě velikost ložisek je pro všechny kategorie stejná, tedy vnitřní průměr 8 mm, vnější 22 mm a šířka 7. mm. Kola se mohou lišit geometrií středu, u elektrických longboardů se nejvíce používají středy ABEC nebo Kegel. Dále pak tvrdostí polyuretanu a jeho barvou samozřejmě.



Obr. 10 ABEC 11 97 mm kola [8]

U elektrických longboardů se používají kola, které jsou navrženy opět pro lepší tlumení vibrací. Jedná se o tzv. „all-terrain“ kola, která svými vlastnostmi pojí kola silniční a kola vyložené teréní. Vyvinuty byly firmou Slick Revolution pod označením Foamies. Dnes jsou známi pod značkou Cloudwheels. Na Obr. 11 můžeme vidět částečný řez takového kola. Kromě plastového středu pro ložiska se samotné tělo skládá z tlumícího žebrovaného materiálu, který je zalitý v polyuretanu. Tím dochází jednak k redukci hmotnosti a dále k lepšímu pohlcení vibrací. K tlumení vlivem přejezdu různých spár na vozovce také přispívá fakt, že styčná plocha není rovná jako v případě ABEC 11 ale oblá, tedy na rovné podložce se kola dotýkají jen velmi malou plochou. Vyrábí se v provedení 120 mm a 105 mm, obojí pro longboardy s řemenový pohonem nebo uvnitř kola.



Obr. 11 Řez Cloudwheel kolem [9]

1.2 ELEKTRICKÉ LONGBOARDY

Myšlenka poháněného longboardu je zde už velmi dlouho, až donedávna však byly limitovány dostupnými technologiemi dané doby. Zřejmě první masově vyráběný jsme mohli vidět už v roce 1975 s názvem MotoBoard (Obr. 12). Jde o upravený skateboard, který v zadní části nese malý dvoutaktní jednoválcový motor a přes řetěz pohání jedno zadní kolečko. Jednalo se spíše o další druh zábavy než o dopravní prostředek, čemuž pomohl i zákaz takových skateboardů v Kalifornii v roce 1977 [10].



Obr. 12 MotoBoard z roku 1975 [11]

Od té doby vzniklo ještě spousta dalších výrobců poháněných skateboardů/longboardů, další vývoj se ale ubíral ve smyslu větší kompaktnosti. To umožňoval pohon elektrickým motorem s akumulátorem uloženým pod deskou. Jeden takový můžeme vidět na Obr. 13. V roce 1999 se jednalo o naprostý hit, nejen že longboard alespoň z vrchu vypadal téměř jako klasický, ale nabízel i bezdrátové ovládání rychlosti [11]. Přelom tisíciletí byl pro elektrické přepravníky vůbec přelomový, vždyť i před pár lety velmi populární Segway (balanční dvoukolevý přepravník) vznikl v roce 2001. I zde ale byly limitující dostupné součástky v dané době, hlavně olověné akumulátory a kártáčové DC elektromotory. Situace se změnila až s větší dostupností lithiových akumulátorů a bezkártáčových DC motorů, které konečně umožnili najít rovnováhu mezi hmotností, výkonem a dojezdem na jedno nabití.



Obr. 13 Elektrický skateboard Louie Finkla z roku 1999 [11]

1.2.1 BOOSTED

Za výrobcem Boosted boardů stojí trojice studentů, kteří se potřebovali dopravovat po kampusu vysoké školy v Kalifornii. V crowdfundingové kampani na síti Kickstarter v roce 2013 se jim podařilo vybrat více jak 460 000 \$, tedy téměř pětikrát více než potřebovali na spuštění výroby [12]. V té době asi netušili, jak velký dopad budou mít na celý trh elektrických longboardů a kolik dalších firem se jejich výrobkem inspiruje. Jak již bylo napsáno v předchozích kapitole, elektrické longboardy existovali dlouhé roky před příchodem Boostedu, ale až jim se podařilo prorazit s poháněným longboardem pro zábavu i každodenní dojíždění.

Svoje první kroky dokumentovali na blogu, kde byly popsány důvody jednotlivých technických řešení a fáze prototypování až po doručení prvním zákazníkům. Téměř všechny postupy zde uvedené jsou dodnes platné a velmi přínosné pro každého kdo se výrobou elektrických longboardů zabývá [13]. Pro účely této práce je nejzajímavější koncept pohonu. Ten se vždy skládal z dvojice elektromotorů, které pomocí ozubeného řemene pohání každý jedno zadní kolo. Vyráběla se i verze s jedním motorem a pouze jedním hnaným kolem ale ta byla brzy stažena. Na Obr. 14 vpravo nahoře můžeme vidět ranný prototyp kdy jsou motory drženy pouze jedním držákem uprostřed. Takové řešení bylo sice poměrně elegantní a šetřilo hmotnost, ale projevovalo se větším namáháním ložisek motorů a nemožností dostatečně řemen napnout. V popředí Obr. 14 můžeme vidět jejich finální verzi hnacího ústrojí 1. generace Boosted Boardu. Ten se skládá z dvojice elektromotorů, které jsou pomocí dvou držáků spojeny k hangeru. Zajímavostí je že motory jsou řízeny pomocí magnetických senzorů s Hallovým jevem umístěných v krytech pastorků (obvykle jsou umístěny přímo uvnitř motoru). Dále stojí za povšimnutí způsob napínání řemenu, ten je zde řešen pomocí dvou tlačných pružin schovaných v těle držáků.



Obr. 14 – Hnací ústrojí 1. generace Boosted Boardu [13]

Postupně svůj návrh bez větších koncepčních změn vylepšovali až po poslední, v pořadí 3. generaci prodávanou od roku 2017. V této generaci si Boosted vyvinul téměř všechny komponenty tzv. „in house“, i ty které do té doby byly dodávány od jiných výrobců. Došlo tak na vlastní desku, vlastní kola anebo např. elektromotory. S touto generací přišla i nová řada menších a lépe přenosných longboardů Boosted Mini S, případně výkonnější verze X. Na Obr. 15 jsou modely 3. generace vedle sebe, zleva jde o nejmenší Boosted Mini S, uprostřed nejprodávanější model Boosted Board a napravo je výkonnější a dražší verze Boosted Stealth. Velké změny nastaly i v druhé generaci, kdy byla přidána varianta vedle LiFePO₄ akumulátoru v 1. generaci i Li-iontový který umožňoval dvakrát delší dojezd.



Obr. 15 – modely 3. generace výrobce, nalevo Boosted Mini S, uprostřed Boosted Board a napravo Boosted Stealth [14]

Další změnou už v 2. generaci bylo kompletně přepracované hnačí ústrojí (Obr. 16). Koncepce 2 motorů a řemenového převodu zůstala, už ale postrádá dopínací pružiny. Naopak samotný držák byl rozdělen na část nosnou a tzv. „skid plate“, kterým je nosná část obalena. Důvodem bylo časté odírání dolních částí držáků vlivem překážek na vozovce apod. Takto se tomu sice nezabránilo ale bylo pak možné vyměnit pouze skid plate, ne celý držák. V Tabulka 1 můžeme vidět parametry nejvýkonnějšího modelu Boosted Stealth.

Tabulka 1 Vybrané parametry Boosted Stealth [15]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití [km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
39	22	7,7	25	199	2100	-



Obr. 16 – Hnací ústrojí 2. generace Boosted Boardu [16]

Poslední vydaný model tohoto výrobce byla elektrická koloběžka Boosted Rev. I přes obrovskou popularitu a pozici lídra na trhu firma Boosted (předtím Boosted Boards) v roce 2020 bohužel zbankrotovala.

1.2.2 INBOARD

Tento výrobce vznikl v roce 2014, tedy krátce po Boosted Boards. Se svým modelem M1 přinesli spoustu nových a progresivních nápadů. Prvním a nejvýraznějším přínosem jsou motory umístěné přímo uvnitř kola, z toho vychází i samotný název společnosti. Tím, že se jedná o elektromotory s rotačním pláštěm, bylo možné k tomuto plášti připojit kolo a převádět tak otáčky napřímo [17].

Toto řešení má spoustu výhod, je to zejména malý zástavbový prostor, který propůjčuje elektrickému longboardu vzhled nerozeznatelný od klasického. S tím se pojí i malá servisní náročnost, protože takové hnací ústrojí se jednak skládá z méně částí než pohon řemenovým převodem, ale také je tam minimum pohyblivých částí. Z těchto důvodů bývá takové hnací ústrojí zpravidla lehčí oproti řemenovému převodu. V neposlední řadě, v případě vybití akumulátoru se stále lze dopravovat odrážením jako na klasickém longboardu, protože tento pohon poskytuje menší odpor při volném otáčení.

Samozřejmě to má i spoustu nevýhod, mezi uživatelsky nejvíc znatelné patří mnohem menší tlumení vibrací. To je dáno tím, že poměrně velká část materiálu z kola musela být odebrána, aby vzniklo místo pro elektromotor a mezi motorem a vozovkou zůstává jen několik milimetrů polyuretanu. Toto redukované kolo navíc podléhá poměrně rychlému opotřebení. Uživatel navíc nemá takové možnosti při výměně, jelikož tyto redukovaná kola nejsou napříč výrobcí normalizována. Dále zde samozřejmě nedochází ke zvýšení hnacího momentu vlivem převodu, to může být vykompenzováno větším motorem s vyšším momentem.

Problém s tlumením vibrací nabízí řešení v podobě Cloudwheels Donuts, což je série kol vyráběná i pro ústrojí s motorem v kole, díky většímu průměru ale dojde ke zvýšení maximální rychlosti a zároveň snížení hnací síly.

Inboard M1 (Obr. 17) ale není pokrokový jen hnacím ústrojím ale i umístěním akumulátoru. Ten je zde umístěn přímo v desce, tím je celkový vzhled nerozeznatelný od klasického longboardu zaručen. Tvůrcům se podařil udělat přístup k akumulátoru uživatelsky přívětivý a lze ho tedy měnit opravdu v řádu několika sekund. Stačí pouze otočit zámek na horní straně desky, odklopit kryt, vyměnit a zajistit akumulátor a opět zavřít. Akumulátor nemá velkou kapacitu, ale je to zároveň i záměrem, jelikož s kapacitou pod 100 Wh mu to umožňuje cestování letadlem (ve většině společností). Navíc je tento longboard opatřen předními i zadními světly umístěnými přímo v desce. V Tabulka 2 můžeme vidět parametry modelu M1. Bohužel i tento výrobce se do dnešních dnů neudržel a v roce 2019 zanikl.



Obr. 17 – Inboard M1 [18]

Tabulka 2 Vybrané parametry Inboard M1 [19]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití[km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
35	15	6,4	18	97	1600	-

1.2.3 EVOLVE SKATEBOARDS

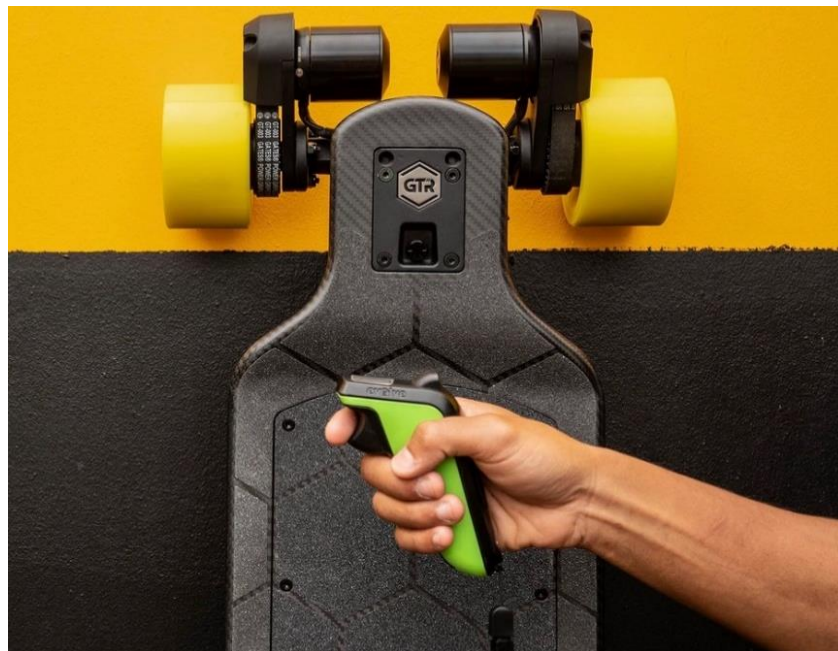
V roce 2012 řešil Jeff Anning společně s manželkou problematiku elektrických longboardů a stejně jako Boosted Boards nebyl spokojen se stávajícími výrobky. Od prvního modelu (Obr. 18) bylo vyvinuto mnoho modelů až po zatím poslední (Obr. 19), kde je již téměř vše navrženo přímo samotným výrobcem. Charakteristickým rysem je od začátku použití DKP trucků, jejich vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 1.1.2. Kromě ranných modelů je také vždy pozice motorů až za zadní truckem. Dalším přínosem je velká variabilita kol, díky řemenovému převodu lze použít většinu dostupných longboardových kol ale výrobce sám dodává i kola pneumatická. Dále stojí za povšimnutí nabídka desek, kdy kromě nejzákladnějšího modelu Stoke jsou všechny ve verzi ze dřeva nebo z karbonové tkaniny. Dohromady je možné si zakoupit Evolve skateboard v osmnácti různých variantách které vychází z modelových řad Stoke, GTR a Hadean. Na Obr. 20 je znázorněn model GTR v karbonové verzi se silničními koly. Vývojem prošli ale nejen samotné longboardy ale i ovladač sloužící k řízení. Ovládání zde probíhá trochu netradičně, a to dvěma páčkami. Jedna slouží pouze pro akceleraci (ovládaná ukazováčkem) a druhá pouze k brždění (ovládaná palcem). Pro akceleraci je navíc potřeba zároveň stlačit i další bezpečnostní tlačítko, to je pro případ nechtěné akcelerace, když je longboard např. přenášen apod. Většina ovladačů je ovládaná pouze palcem a některé nejsou ani vybaveny bezpečnostním tlačítkem, tzv. „death switchem“. Značka Evolve skateboards se dnes prezentuje jako prémiová a zároveň je jedna z nejstarších stále fungujících, což jí poskytuje silnou pozici na trhu.



Obr. 18 První prodáváný model Evolve skateboards [20]



Obr. 19 Zatím poslední a nejvýkonnější model Hadean ve verzi Bamboo s AT koly [21]



Obr. 20 Evolve skateboard GTR v karbonové verzi s ovladačem [22]

V Tabulka 3 jsou parametry nejvýkonnějšího a zároveň nejdražšího modelu Hadean.

Tabulka 3 Vybrané parametry Evolve Hadean Carbon AT [23]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití[km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
42	40	13,5	35+	691,2	3000	-

1.2.4 MELLOW BOARD

Tento Německý výrobce přišel na trh s velmi univerzálním řešením ideální pro zákazníky, co už nějaký longboard mají a chtěli by ho jednoduše přestavět na elektrický pohon. Hnací ústrojí se skládá z motorů uvnitř koleček, dále částí s řídicí jednotkou a vyměnitelným akumulátorem (Obr. 21). Samo o sobě by to nebylo nic nového, ale genialita se skrývá ve spojení všech těchto součástí v jeden celek. Elektromotory jsou logicky připevněny k truckům, ale baseplate trucku pokračuje dál a tvoří zároveň i držák řídicí jednotky i akumulátoru. Následná přestavba klasického longboardu je tedy velmi snadná, stačí odmontovat zadní trucky a místo něj vložit Mellow pohon. Řešení je to vhodné hlavně pro každodenní dopravování, jelikož nenabízí příliš velký dojezd, ale v případě potřeby je možné akumulátor snadno vyměnit. Navíc se tím podařilo citelně ušetřit hmotnost. Unikátní je zde také tzv. „endless mode“, který se snaží o co nejvěrnější navození zážitku z klasického longboardu. V tomto módu se uživatel může volně odrážet a elektromotor se snaží pouze asistovat, tedy držet otáčky a jen pomalu je snižovat. Tím navíc dojde k velké úspoře energie a zvýšení dojezdu. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry Mellow Board Cruiseru.



Obr. 21 Mellow Board Cruiser [24]

Tabulka 4 Vybrané parametry Mellow Board Cruiser [24]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití [km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
40	15	3,9*	15	99	-	6

*Hmotnost pouze Mellow pohonu bez desky a předních trucků s koly

1.2.5 EXWAY

Výrobce Exway je jedním z mladších na trhu, vznikl v roce 2016 a profiluje se jako výrobce high-end elektrických skateboardů [25]. Jeho patrně nejznámější model je Exway X1 Pro a následující generace Max. Jde o podobný koncept jako byl Inboard M1, tedy motory přímo uvnitř kol a akumulátor skrytý v desce. Na rozdíl od Inboardu ale není akumulátor výměnný, zároveň ale bylo možné zvětšit jeho rozměry, což mělo za následek téměř dvakrát větší dojezd. Tento model ale patří k lehčím na trhu začínající u modelu X1 Max na 7,6 kg. Je zde vidět i určitý tlak od zákazníků na variabilitu. Výrobce Evolve skateboard nabízí svým zákazníkům různé druhy kol a desek, Exway přišel s trochu jiným konceptem, a to výměnné pohonné ústrojí. U modelu X1 Max, X1 Flex i Wave si totiž zákazník může zvolit, zda chce pohon s motory uvnitř kol anebo pohon pomocí ozubených řemenů. Navíc, pokud by si to z nějakého důvodu rozmyslel je možné tyto pohony jednoduše zaměnit, konektory i řídicí jednotka jsou připraveny na obě možnosti. Na Obr. 22 nahoře lze vidět Exway X1 Flex s HUB pohonem (tedy motory uvnitř kol), dole X1 Flex s Riot pohonem (pohon přes ozubený řemen). V Tabulka 5 jsou uvedeny parametry modelu X1 Pro.



Obr. 22 Nahoře Exway X1 Flex HUB, dole Exway X1 Flex Riot [26]

Tabulka 5 Vybrané parametry Exway X1 Pro [27]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití[km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
46,6	25	7,3	30	193	1200	-

S rozšířením elektrických longboardů došlo i na závodění, a hlavně pro tyto účely nebo jednoduše pro nejnáročnější zákazníky vznikl i model Atlas (Obr. 23). Jedná se o typově podobný koncept jako např. Evolve GTR nebo Hadean, tedy DKP trucky a možnost terénních i silničních kol. Co je zde opět nové a jinak variabilní je možnost pohonu pouze na zadní nápravu nebo na zadní i přední. To má vliv zejména na zrychlení a pak také na zlepšené jízdní vlastnosti v terénu. Kromě vyšší ceny radikálně přibyla i hmotnost, která ale v tomto segmentu není určující. V Tabulka 6 můžeme vidět parametry nejvýkonnějšího modelu Atlas 4WD.



Obr. 23 – Exway Atlas 4WD [28]

Tabulka 6 Vybrané parametry Exway Atlas 4WD [28]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití [km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
51	42*	12,5	40	518	3000	28

*Dojezd udávaný se silničními koly

1.2.6 JETSURF

Jetsurf jak už z názvu napovídá se zabývá výrobou motorových surfů, původně poháněných pouze spalovacím dvoutaktním jednoválcovým motorem, dnes i elektromotorem. Je zakladatelem a organizátorem závodů motorových surfů. Se stejnou myšlenkou závodních speciálů dnes vyrábí i elektrické longboardy. Pro účely této práce bude zkoumáno hlavně pohonné ústrojí, které používají i jiné značky např. Onsra, Miles a další. Jde o zatím nejnovější způsob přenosu točivého momentu a výkonu na kola a za cíl si klade skloubit výhody pohonu přímo v kolech (HUB pohon) a přes ozubený řemen (BELT pohon). Nazývá se „Direct drive“ a přenos probíhá bez dodatečného převodu, motory jsou uloženy v ose kol ale ne přímo uvnitř, nýbrž až mezi koly. To má dvě zásadní výhody, první že takový pohon je tichý a téměř bezúdržbový díky minimu pohyblivých součástí (podobně jako HUB pohon). Druhá spočívá v tlumení vibrací, tím že motory jsou mimo kola tak je možné použít standardní kola bez odebraného středu. S tím souvisí i možnost jednoduše vyměnit kola za jiná, měnit průměry apod. Nevýhody spočívají v malé světlé výšce, tím že elektromotory mají relativně velký průměr a zabírají většinu délky mezi koly jsou náchylné na jakékoliv kamínky na vozovce. To vede k menší spolehlivosti při běžném provozu ale např. na závodech na hladkém asfaltu to nevádí. Další nevýhodou je že výměna kol je sice možná jako u BELT pohonu ale není možné měnit převodový poměr. S většími koly tedy točivý moment zůstává ale hnací síla se zmenšuje, a naopak roste maximální rychlost. Na Obr. 24 je prostřední model z aktuální nabídky, jedná se o model Race určený zejména pro závody, v Tabulka 7 jsou jeho parametry.



Obr. 24 Jetsurf Race [29]

Tabulka 7 Vybrané parametry Jetsurf Race [29]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití[km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
50	40	11,5	30	650	-	-

1.2.7 DALŠÍ VÝROBCI

V předchozích kapitolách byli shrnuti všichni výrobci, kteří nějak koncepčně přispěli do rozvoje elektrických longboardů a to hlavně co se týče jejich pohonu. Existuje však mnoho dalších i větších výrobců kteří zmíněni nebyli.

Jedním z větších a starších stále fungujících výrobců je např. Čínský Backfire, nabízí širokou škálu modelů od velmi kompaktního Backfire Mini s celokarbonovou skate deskou až po terénní Backfire X3 s terénními koly a HUB motory. Dohromady nabízí 10 modelů vycházejících ze 4 modelových řad [30].

Dalším Čínským výrobcem je Meepo, ten se v minulosti soustředil zejména na zákazníky cílící na co nejnižší cenu, to se zároveň i projevovalo na použitých součástkách, a hlavně nedokonalém ovládní. Dnes už se v nabídce objevují i dražší a výkonnější modely např. Meepo Hurricane [31].

Třetím Čínským výrobcem je Wowgo, který se zaměřuje zejména na poměr cena/výkon. Nejlevnějším modely začínají s cenovkou pod 600 \$ a nejdražším je terénní verze která vyjde lehce přes 1000 \$ [32].

Z Evropských výrobců je zde také Onsrá jejichž majitel pochází ze Švýcarska a než začal s tímto podnikáním vyzkoušel přibližně 250 různých elektrických longboardů různých značek. I díky těmto zkušenostem se stal uznávaným výrobcem, jeho modely patří k těm spíše dražším a jsou pouze dva, u každého z nich ale nabízí 3 různé varianty s různými pohony a koly [33].

Za zmínku také stojí výrobce Slick Revolution původem z Velké Británie [34]. U jako jednoho z prvních byl využit flexibilní kryt akumulátoru. Toho bylo docíleno rozdělením krytu do jednotlivých segmentů a tím bylo možné rozprostřít akumulátor po celé délce longboardu při zachování flexibilní desky. Dalším přínosem byly tzv. all-terrain kola, tedy jakýsi mezistupeň mezi silničními a vyloženě terénními koly. Druhou generaci, kterou začal prodávat pod názvem „Foamies“ dnes známe jako „Cloudwheels Discovery“ [35] Je zde mnoho dalších výrobců, které dosud nebyli jmenováni, např. TeamGee, Tynee, Ownboard, Enertion, Verreal, Lyacon, Ecombl, HoytSt, Metroboard a další. Někteří se liší opravdu jen designem a používají totožné součástky, jiné jen lepším zákaznickým servisem apod.

1.3 DALŠÍ VÝVOJ ELEKTRICKÝCH LONGBOARDŮ

Trh se v posledních letech ubírá trochu jiným směrem, než tomu bylo před téměř deseti lety. Od elektrických longboardů (e-boardů) s hlavní myšlenkou dopravního prostředku a zábavy se výrobci stále více zaměřují na výkonnější a dražší modely vhodné i pro závody. Dalším znakem jsou modely s více terénními vlastnostmi, nebo alespoň s možností je snadno přestavět. Objevují se zde kromě převodů ozubeným řemenem i převody ozubenými koly.

Vzniklo i několik výrobců kteří se specializují pouze na výkonnější segment. Jedním z nich je např. Lacroix Boards (Obr. 25). Prvních 25 kusů bylo prodáno v roce 2018. Je označován za Formuli 1 v elektrických longboardech, tomu odpovídají i ceny. Nejlevnější model začíná na částce lehce přesahující 2700 \$, nejdražší model se může dostat až na 5500 \$ [36]. Pro představu budou uvedeny některé z parametrů – dojezd 80 až 160 km, hmotnost 23,2 kg (záleží na modelu a specifikaci) a maximální rychlost není udaná, lze ale předpokládat že bude dosahovat až 80 km/h.

Ve stejném roce také vznikl výrobce Biobords, a i tento výrobce se zaměřuje na nejvýkonnější e-boardy na trhu. U modelu Plutonium výrobce uvádí v případě 2WD pohonu rychlejší akceleraci než jakýkoliv jiný e-board [37].

Výkonnější modely ale v posledních letech uvádí i většina výrobců „klasických“ e-boardů jako je Evolve skateboards, Backfire, Exway, Meepo a další. Jde výhradně o modely, které jsou opatřeny nebo mohou být v konfiguraci s terénními koly a některé mohou být i v konfiguracích poháněných na všechna 4 kola.



Obr. 25 – Lacroix Nazaré lonestar [36]

Existují ale i výrobci, kteří si tak trochu tvoří svůj vlastní segment a téměř nemají přímého konkurenta, jedním z nich je Baja Board (Obr. 26). U jejich modelu G4X sami tvůrci přiznávají že jízda na něm je spíše jako stát na vozidle typu buggy, než na longboardu/skateboardu [38]. Tento model disponuje prvky, které se opravdu vyskytují v automobilovém průmyslu. Jde zejména o nezávislé zavěšení všech kol. Stejně tak jsou všechna kola odpružena a poháněna, můžeme tam najít prvky jako jsou poloosy apod. a to vše dohromady umožňuje bezkonkurenční stabilitu a průchodnost terénem.



Obr. 26 – Baja Board G4X [38]

1.4 ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou shrnuty v současné době dostupné koncepce pohonů. Pro tento účel byla vytvořena rozhodovací matice, kterou představuje Tabulka 8. Porovnává 3 různé pohony, tedy pomocí ozubeného řemene (BELT), pomocí elektromotoru v kole (HUB) a elektromotoru v ose kola (DIRECT). Ve sloupcích jsou uvedeny sledované vlastnosti a v poslední řádce jejich procentuální váha, která byla stanovena podle autorových preferencí. Byla zvolena třístupňová stupnice kde nejlepší je hodnota 3 a nejhorší 1. Sečtením jednotlivých hodnot vlastností, které jsou ještě vynásobeny váhou dané vlastnosti, je výsledkem celkové skóre daného pohonu z hlediska těchto preferencí. Jak můžete vidět, nejvyšší skóre má pohon pomocí ozubeného řemene (BELT). Dále jsou popsány jednotlivé vlastnosti a jejich hodnocení.

Tabulka 8 Rozhodovací matice pro koncepcie pohonů

Druh pohonu	Moment	Hlučnost	Efektivita	Variabilita	Spolehlivost	Hmotnost	Celkové skóre
BELT	3	1	1	3	2	1	2,25
HUB	2	3	2	1	3	3	2,2
DIRECT	2	3	3	2	2	2	2,15
Váha	30%	5%	10%	20%	25%	10%	

Moment – jde o hnací moment přenášený na kola. Pro porovnání bude uvažován elektromotor o stejné velikosti. BELT pohon má v tomto jednu velkou výhodu, a to že moment z motoru je násoben převodovým poměrem mezi pastorkem a řemenicí. Pohony HUB nebo DIRECT také dosahují velkých momentů, ale motory jsou mnohem méně otáčkové a bývají ve větších rozměrech. Proto byla zvolena hodnota 3 pro BELT a 2 pro HUB i DIRECT.

Hlučnost – zde je koncepčně jasné že BELT pohon musí být nejhlučnější, má jednak nejvíce pohyblivých součástí, ale hlavně používá více otáčkové motory. HUB i DIRECT oba přenáší moment a výkon na kola přímo, proto mají oba hodnotu 3 a BELT pouze 1 (rozdíl je opravdu znatelný).

Efektivita – zde je myšleno, jak efektivně dochází k přenosu výkonu a momentu na kola. I když řemenový převod je schopný pracovat s účinností až 98 %, díky malým rozměrům a malým přenášeným momentům bude číslo jistě nižší [39]. Pohony DIRECT i HUB mají tuto účinnost 100 %, protože jsou přímo spojeny s kolem. Pohonu HUB byla přiřazena hodnota pouze 2, protože díky umístění v kole je elektromotor obtížné chladit, a to se projeví na jeho účinnosti.

Variabilita – Zde se myslí hlavně variabilita použití různých kol. V tomto ohledu vychází nejlépe BELT pohon, jelikož u něj lze kola jednoduše měnit ale společně s nimi i převodové poměry. Lze tedy zachovávat maximální rychlost i hnací síla. Pohon HUB má také možnost měnit průměry ale jednotlivá kolová „pouzdra“ nejsou napříč výrobci standardizována a pokud dojde k výměně, změní se i parametry pohonu. Pohonu DIRECT byla udělena hodnota 2, ten sice může jednoduše změnit kola, protože používá standardizovaná, ale už nemůže změnit převodový poměr mezi elektromotorem a koly a opět dochází ke změně parametrů pohonu.

Spolehlivost – tuto vlastnost lze těžko objektivně kvantifikovat, dnes už jsou všechny typy pohonů na vysoké úrovni a počáteční nezdary jsou vyřešeny. Proto také nikde nebyla udělena nejnížší hodnota. Pokud ale jde o co nejmenší údržbu, odolnost proti překážkám na vozovce apod. vychází asi nejlépe pohon HUB. Elektromotor v kole dostává sice rázy od vozovky, ale není vystaven přímému zásahu a má minimum pohyblivých součástí. BELT pohon má sice asi

nejvíce nároků na údržbu, pokud je ale provozován ve standardních podmínkách a má vyřešeno dopínání řemenů, dokáže také velmi dlouho fungovat bez údržby (např. HoytSt konstrukce pohonu [40]). Samotné elektromotory jsou více chráněny svým umístěním nad osou kol. Pohon DIRECT má také velmi málo pohyblivých součástí jako HUB, na rozdíl od něj ale netrpí na rázy od vozovky. Více ho trápí malá světlá výška a vystavení elektromotoru všem překážkám na vozovce. V případě použití pro závody to nevadí, v běžném provozu to ale spolehlivost snižuje, proto byla udělena stejná hodnota jako BELT.

Hmotnost – zde poskytují dobré srovnání modely výrobců, které nabízí BELT i HUB pohon. Jde např. o Exway X1 Max, kde s HUB pohonem váží 7,6 kg a ten samý model s BELT pohonem 7,9 kg (Exway ho nazývá Riot) [41]. Přímé srovnání s pohonem DIRECT nabízí výrobce Onsra s modelem Challenger, díky větším motorům u DIRECT pohonu se ale hmotnostní rozdíl smazává a oba modely váží stejně [42]. Při uvažování podobných velikostí motorů lze ale předpokládat nižší hmotnost než BELT.

Dle daných preferencí vítězí BELT pohon a vybrán byl hlavně díky použití v mírně kopcovitém městě s neúplnou sítí cyklostezek a často horší vozovkou, jako je např. Brno. Neznamená to že pohony HUB a DIRECT jsou horší, jen jsou vhodnější pro jiné podmínky použití.

2 CELKOVÁ KONCEPCE

Navrhovaný elektrický longboard se nebude příliš lišit od ostatních, bude to spíše kombinace, kterou takto nikdo nenabízí. V předchozí kapitole byla vyřešena otázka pohonu, další žádanou vlastností je výměnný akumulátor a pro dopravu ve městě deska s tzv. „kickem“ (ohnutou deskou na konci). Tím se dostáváme ke koncepčně nejbližšímu modelu, kterým je Exway Wave s pohonem Riot (Obr. 27). Jedná se o kategorii elektrických shortboardů. Deska je kratší než klasické longboardy ale delší než skateboardy a stále používá longboardové trucky s rozchodem přibližně 180 mm. Téměř vždy jsou opatřeny „kickem“ nakonci, tím se také liší od skateboardu, který je opatřen „doublekickem“ (ohnutou deskou na obou stranách).

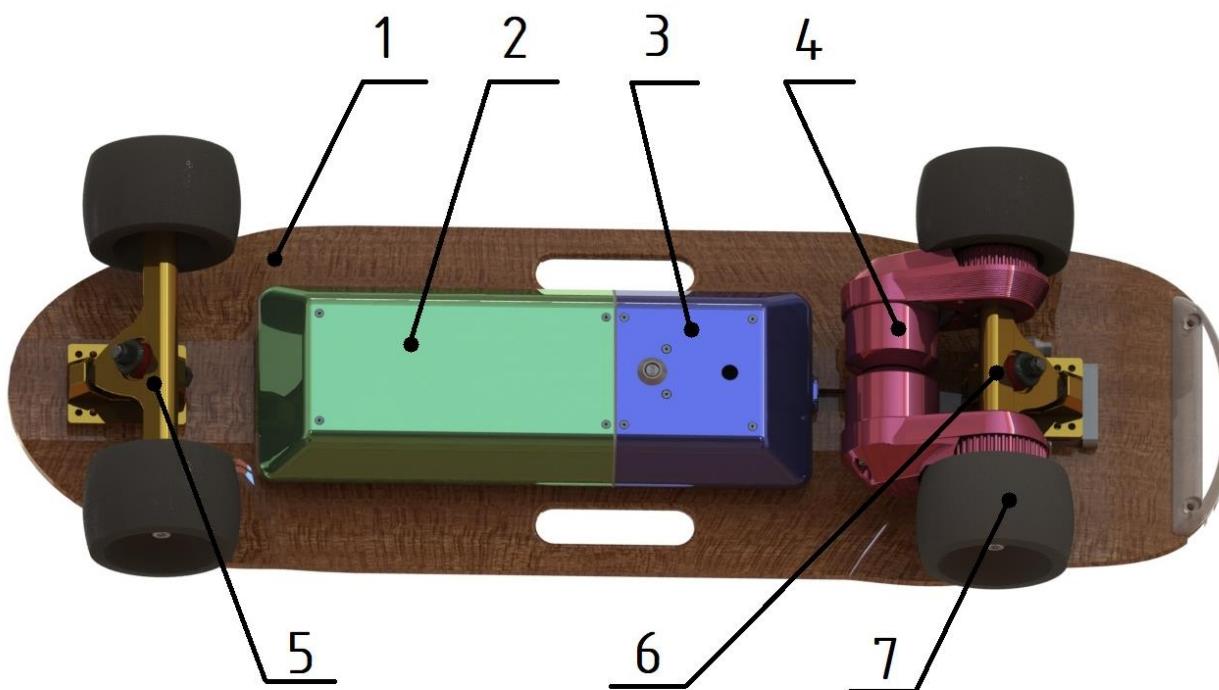


Obr. 27 Exway Wave Riot [43]

Tabulka 9 Vybrané parametry Exway Wave Riot [43]

Max. rychlost [km/h]	Dojezd na jedno nabití [km]	Hmotnost [kg]	Maximální stoupání [%]	Kapacita akumulátoru [Wh]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
38	24	6,9	25	216	2000	8,6

Exway Wave je doporučovaný pro alespoň mírně pokročilé uživatele, protože není tak stabilní jako delší longboardové modely. To zároveň přináší lepší obratnost a kompaktnější rozměry. V Tabulka 9 jsou uvedeny vybrané parametry modelu Wave Riot. Počáteční koncepční řešení můžete vidět na Obr. 28 kde budou dále popsány základní součásti elektrického longboardu.



Obr. 28 Koncepce elektrického longboardu; 1 – deska, 2 – kryt akumulátoru, 3 – kryt regulátoru, 4 – hnací ústrojí, 5 – přední truck, 6 – zadní truck, 7 – kola

Pozice 1 – deska, hlavní nosný prvek, který všechno spojuje a udává tvar longboardu. Neměla by přesahovat délku 85-90 cm aby bylo možné ji držet v ruce ve svislé poloze a zároveň se nedotýkala země.

Pozice 2 – kryt akumulátoru, musí být dělený od krytu regulátoru kvůli jednoduché výměně. Kromě akumulátoru poskládaného z jednotlivých článků bude obsahovat i BMS, nabíjecí konektor a konektor pro připojení k regulátoru.

Pozice 3 – kryt regulátoru, v něm bude uložena řídicí jednotka (regulátor), která řídí tok energie z akumulátoru do elektromotorů. Kromě něj tam budou tlačítka pro zapnutí/vypnutí celého longboardu a tlačítko pro vyjmutí akumulátoru. Regulátor nemusí být jednoduše výměnný a bude proto připevněný k desce šrouby.

Pozice 4 – hnací ústrojí, bude se skládat z dvou elektromotorů který každý bude přes ozubený řemen pohánět jedno zadní kolo. Pro tuto funkci bude zapotřebí ještě navrhnout držáky motorů, řemenici a kryty proti nečistotám.

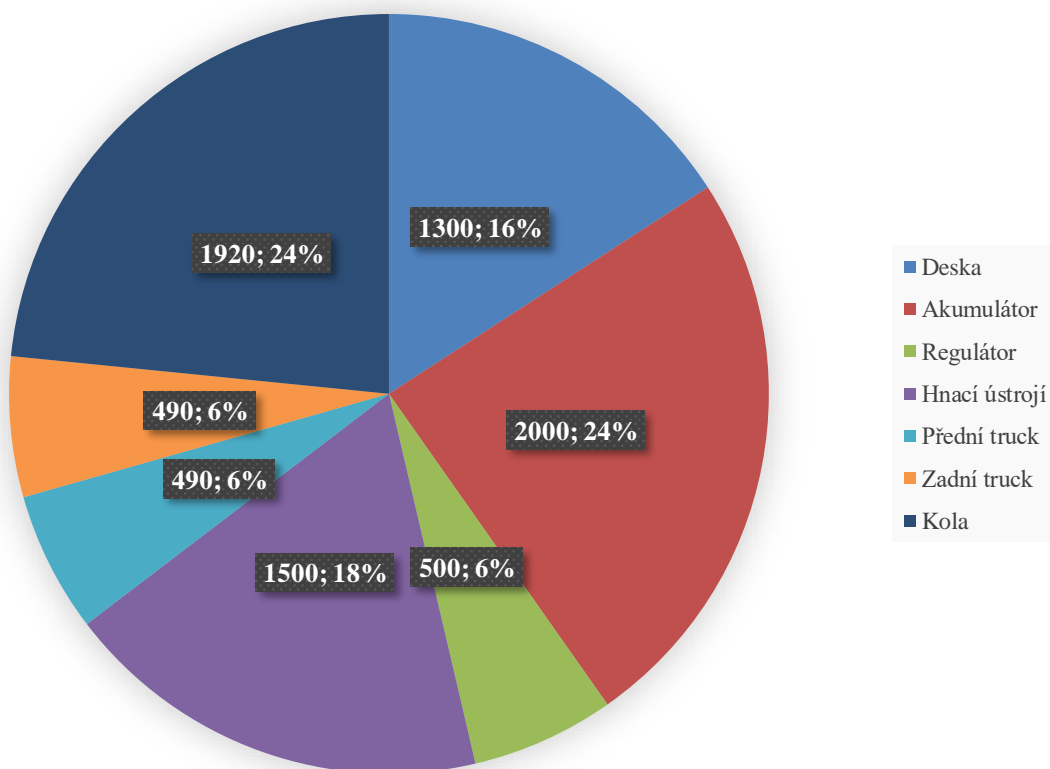
Pozice 5 – přední truck, protože se nejedná o hnanou nápravu může přední truck zůstat jako standardní, vyráběný pro klasické longboardy

Pozice 6 – zadní truck, zde bude zapotřebí vyřešit napojení držáků elektromotorů k trucku. Většina výrobců to řeší vlastním návrhem hangeru, lze ale uvažovat i o možnosti standardního trucku pro klasické longboardy doplněného o vlastní unašeč.

Pozice 7 – kola, elektrický longboard bude provozován na horších komunikacích a budu tedy od začátku uvažovat použití univerzálních kol Cloudwheels Discovery.

2.1 ANALÝZA HMOTNOSTI

Pro návrh všech výše zmíněných částí je vhodné porovnat hmotnost jednotlivých komponent a udělat si představu kde je možné ušetřit. V Tabulka 8 byly porovnány hmotnosti jednotlivých pohonů a této vlastnosti byla přiřazena váha pouze 10 %. Z celkového hlediska je ale i hmotnost důležitá hlavně kvůli praktičnosti při manipulaci, z pohledu jízdní dynamiky má jen malý vliv, protože jezdec je několikrát těžší. Celková hmotnost byla stanovena kolem



Obr. 29 Podíl předpokládaných hmotnosti jednotlivých komponent e-boardu (uvedené hodnoty jsou v gramech).

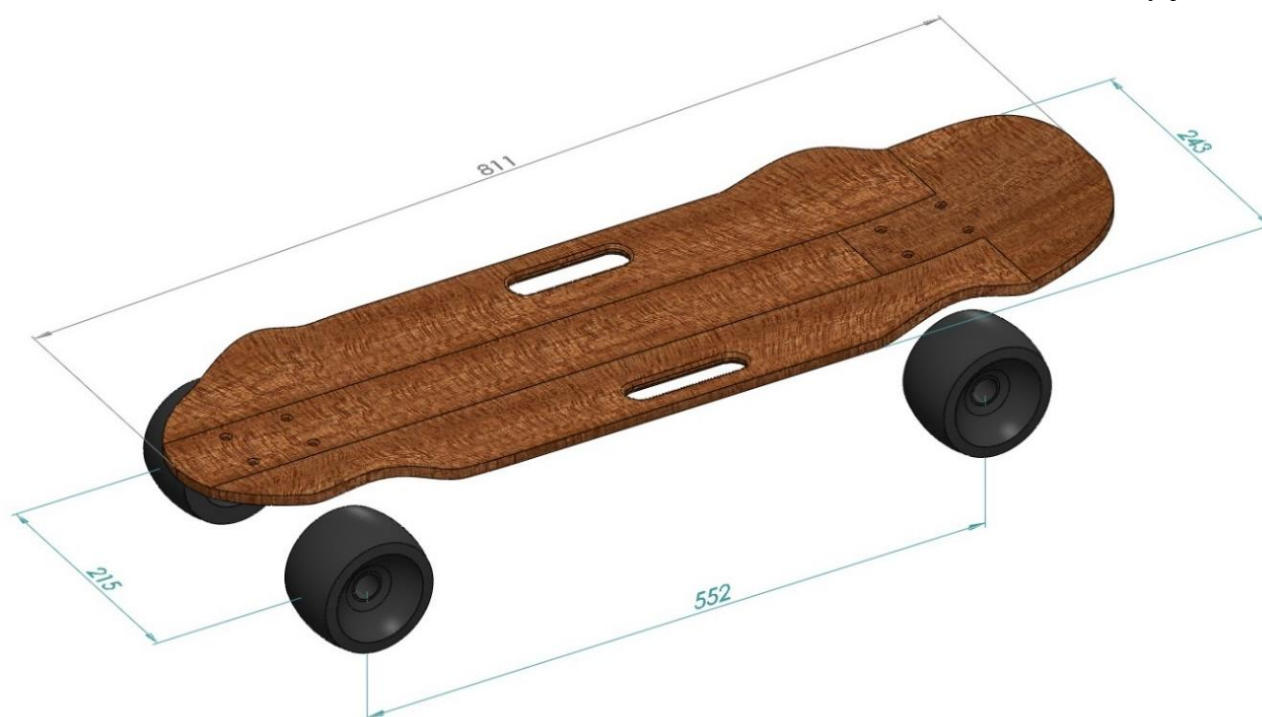
8 kg.

Hmotnost u součástí, které jsou nakupované se dají jednoduše změřit, u součástí, které budou navrženy jsou to zatím jen předpoklady na základě koncepčních modelů. Tyto hodnoty jsou obrazy na Obr. 29. Za povšimnutí stojí zajímavý fakt, že kromě akumulátoru zaujmají téměř shodnou hmotnost kola. Už zde tedy lze říct že pokud by byla snaha snížit hmotnost e-boardu, výraznou, a přitom jednoduchou změnou by byla výměna kol za jiné a menší.

3 NÁVRH DESKY

Jako první je třeba si stanovit rozměry a tvar desky, protože to bude hrát velkou roli při pozdějším návrhu rozměrů akumulátoru, regulátoru a jejich krytů. Další významný vliv bude na jízdní vlastnosti. Tato práce se zabývá návrhem hnacího ústrojí pro elektrický longboard vhodný ke každodennímu dojíždění po městě, cílem není vytvořit závodní speciál. Není požadována vysoká stabilita při vysokých rychlostech, spíše je kladen důraz na minimální poloměr zatáčení, skladné rozměry, ergonomie při nošení apod.

Délka navržené desky je 810 mm, to umožňuje desku držet ve svislé poloze, aniž by se dotýkala země. Šířka je zde trochu větší než standardní a to 243 mm. Důvodem je další malý detail, který je třeba zohlednit vzhledem k použití a tím je jízda za mokra. Záměrně byla zmíněna mokrá vozovka, ne přímo déšť i když i při jízdě na mokré vozovce je riziko pádu samozřejmě větší než za sucha. Obecně to většina výrobců nedoporučuje ale zároveň uvádí u svých modelů voděodolnost. Pokud je k tomu uživatel donucen, je třeba zajistit i komfort za tohoto stavu. Pokud má deska tvar drop-throw nebo drop-deck, všechny nečistoty a voda ze země se při jízdě nabalují na kolo a naprosto dokonale stříkají na oblast nohou uživatele. Řešení by bylo možné použitím blatníků, jako např. Exway Atlas. Ten ale používá pneumatická kola a celkovému off-road vzhledu to nevádí. U silničního e-boardu byla snaha se blatníkům vyhnout, a tak byla deska navržena jednoduše natolik široká, aby zakryla velkou část kol a riziko stříkající vody bylo minimalizováno. Nese to sebou riziko kolize kol s deskou při zatáčení, proto jsou v oblasti kol velké prolisy, které mají toto riziko minimalizovat. Je třeba si uvědomit že na vznik této kolize má vliv i utažení trucků, které si musí každý jezdec



Obr. 30 – Model desky se základními rozměry.

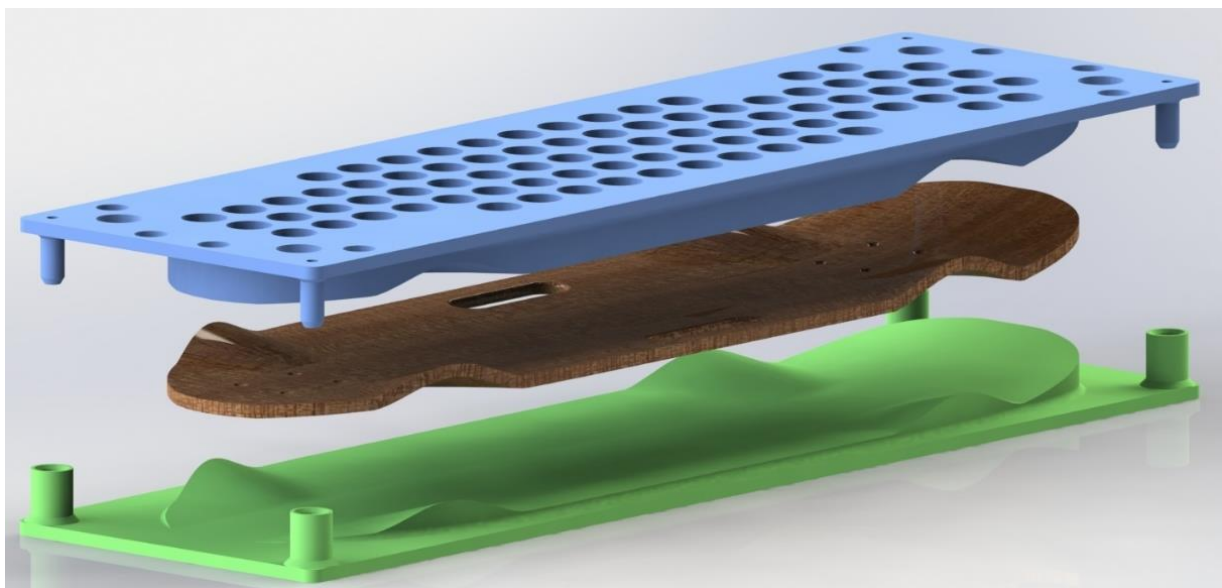
vzhledem ke své vlastní hmotnosti a stylu jízdy nastavit sám. Kromě samotné desky bylo třeba ještě zvolit vhodnou pozici trucků a vyhodnotit, zda je desku s takovými prolisy ještě reálné vyrobit či nikoliv. V CAD modelu vytvořeném v programu Solidworks byla sestava zavazbena do maximální polohy při zatáčení, kdy deska se zemí svírá úhel 13° a minimální poloměr zatočení činí 1302 mm. Konečný model desky i se správnou pozicí trucků můžete vidět na Obr. 30.

3.1 MATERIÁL DESKY

Pro výběr materiálu bylo třeba opět zohlednit účel. Deska bude provozována v městském prostředí, je tedy vhodné, aby pokud možno co nejvíc tlumila rázy a tím zvyšovala komfort při jízdě. Byla proto zvolena klasická koncepce, a tedy výroba desky ze dřeva. Tento materiál se v rámci longboardů stále velmi často používá i když by se mohlo zdát, že je dnes překonán karbonovými a dalšími tkaninami. Jeho výhodou je, kromě dobrých tlumících schopností (i když samozřejmě záleží na druhu dřeva) i relativně nízká cena a snadná výroba. Nevýhodou je, že dřevo je anizotropní materiál, navíc i v rámci jednoho kmene se jeho mechanické vlastnosti mohou lišit podle toho z jaké části byl materiál odřezán. Po udělení několika vzorků, kde bylo experimentováno s dřevěnými dýhami a skelnou tkaninou různých gramáží, byla nakonec vybrána kombinace pouze dřevěných dýh, i z hlediska výrobní náročnosti. Jde o borovicové, topolové a bambusové překližky a dýhy o tloušťkách 4 mm u překližek a 0,5 mm u dýh.

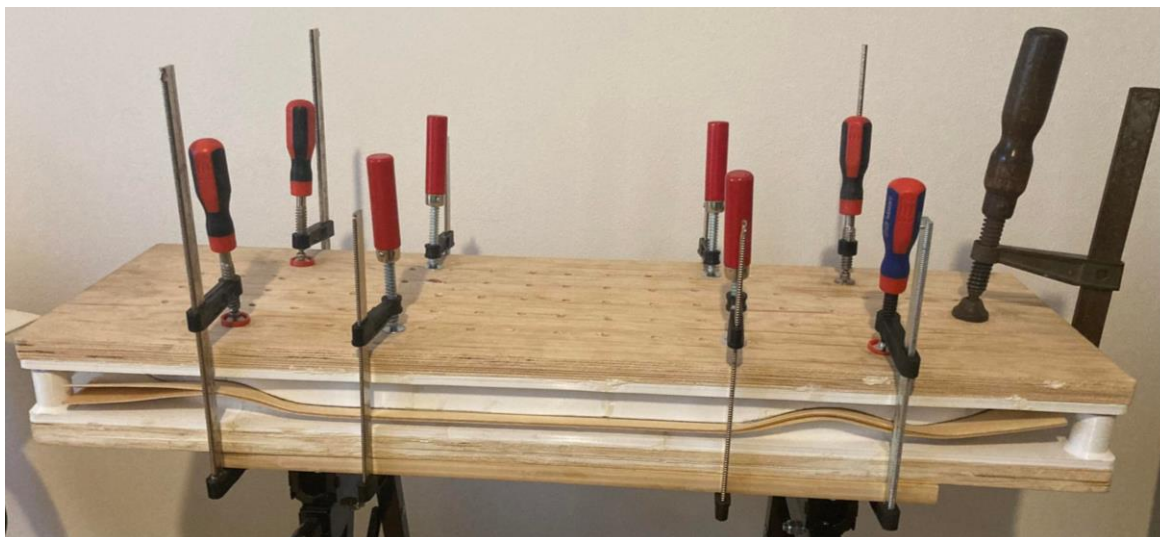
3.2 VÝROBA DESKY

Po vytvoření geometrie a volbě materiálu přišla nejnáročnější část, tedy samotné lisování a lepení desky. Pro tyto účely byla vytvořena lisovací forma, kterou můžete vidět na Obr. 31. Pro její zhotovení byl využit 3D tisk, oba díly formy byly rozděleny na dohromady 22 segmentů tak, aby bylo možné je vytisknout na standardní FDM tiskárně s pracovním prostorem 220 x 220 x 250 mm. Časově to bylo velmi náročné, celkový výrobní čas všech segmentů dohromady přesahuje 278 h. Segmenty byly poté slepeny k sobě čímž vznikly viditelné přechody, ale ani ty a ani nerovnosti vzniklé jednotlivými vrstvami neměly vliv na vyráběnou desku.



Obr. 31 Forma na tváření dřevěné desky

Jednotlivé dýhy a překližky byly namáčeny vodou a poté tlakem tvarovány ve formě, kde se nechaly vyschnout a tím získali potřebný tvar. U některých vrstev bylo nutné tento postup opakovat i dvakrát. Po natvarování všech vrstev byly opět pod tlakem lepeny k sobě. Následně byl vyříznut obrysový tvar a hrany zabroušeny. Tlak byl zajištěn pomocí svěrek, jak můžete vidět na Obr. 32.



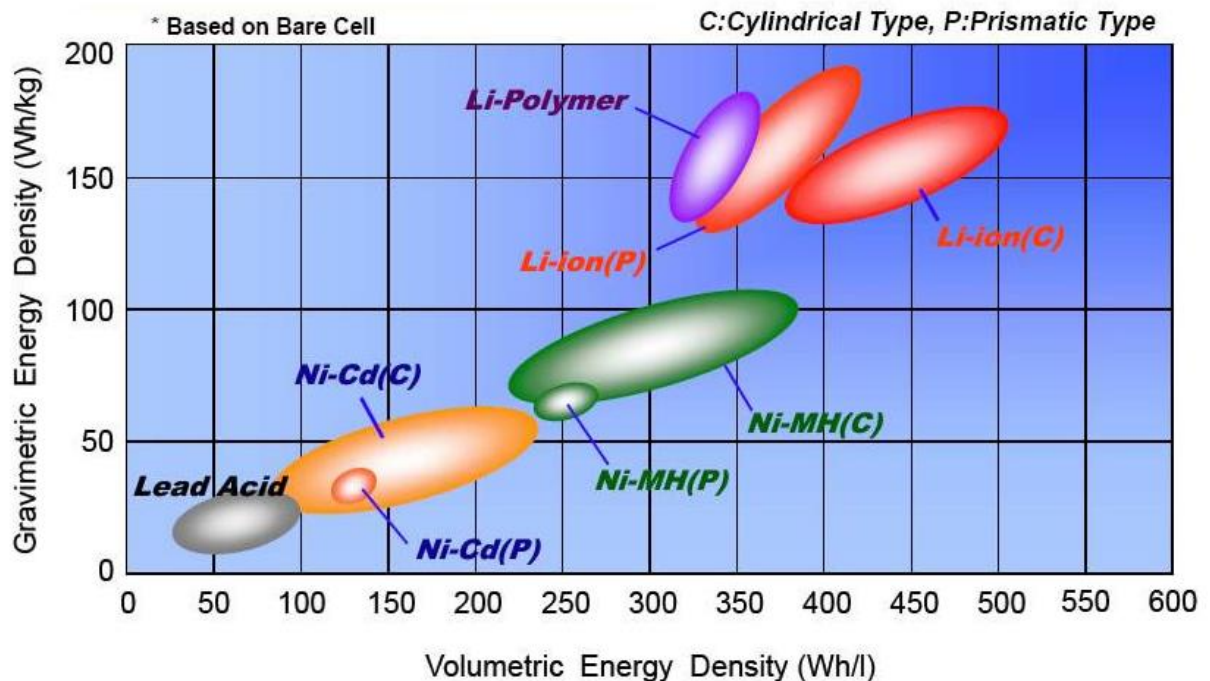
Obr. 32 Lisování a schnutí překližek a dýh ve formě

4 NÁVRH AKUMULÁTORU

Pro sestavení akumulátoru bylo nutné nejdříve vybrat vhodné články a jejich konfiguraci zapojení. Poté bylo řešeno prostorové uspořádání a návrh krytu. Zvláštním požadavkem celého akumulátoru je snadná vyměnitelnost a dále voděodolnost.

4.1 VÝBĚR AKUMULÁTOROVÝCH ČLÁNKŮ

Pro prostředky poslední míle se nejčastěji používají články s označením 18650 a 21700. První dvě čísla značí průměr v milimetrech, další dvojice značí délku také v milimetrech. Není to samozřejmě jediný rozměr, dělají se ještě větší 26650 i menší 14500, což je rozměr klasických tužkových baterií s označením AA. Tyto všechny výše zmíněné jsou články cylindrické, používají se ale i články prismatické – tedy ne s válcovým tvarem ale kvádrovým. Z chemických složení se můžeme setkat s Li-ion (nejčastěji 18650 a 21700), dále LiFePO_4 (hlavně 26650) a poté Li-pol (hlavně prismatické). Na Obr. 33 je srovnání jednotlivých článků podle jejich chemie, kromě lithiových tam můžeme vidět i starší typy jako jsou niklové a olověné akumulátory. Jde o ne zcela aktuální graf, zejména lithiové články jsou v neustálém vývoji, ale pro porovnání jednotlivých druhů chemií to postačí. Z grafu lze vidět že pro dopravní prostředek typu elektrického longboardu, kde celková hmotnost a rozměry hrají kritickou roli, lze uvažovat pouze články lithiové. Ty mají největší energetickou hustotu i vzhledem k hmotnosti ale i objemu. V Tabulka 10 je srovnání několika článků, které připadali v úvahu vzhledem k dostupnosti v EU. Jde o články pouze cylindrické, prismatické jsem neuvažoval z důvodů horší dostupnosti.



Obr. 33 Srovnání energetické hustoty akumulátorových článků podle jejich chemického složení [44]

Tabulka 10 Srovnání vybraných akumulátorových článků

Označení článku	Chemie článku, rozměr	Nom. Napětí U_1 [V]	Min. kapacita C_1 [mAh]	Max. proud [A]	Hmotnostní e. hustota ρ_m [Wh/kg]	Volumetrická e. hustota [Wh/l]	Cena za 1 ks [€]
Sony / Murata US18650VTC6 [45]	Li-ion, 18650	3,6	3000	30	225	653	9,95*
LG ICR18650-HG2 [46]	Li-ion, 18650	3,6	3000	20	239	653	5,95*
Molicel INR21700-P42A [47]	Li-on, 21700	3,6	4000	45	200	594	7,49*
Lithium Werks ANR26650M1-B [48]	LiFePO ₄ , 26650	3,2	2500	50	126	231	8,75*

*ceny jsou uvedeny k 23.4.2022, bez množstevních slev

V Tabulka 10 jsou kromě vypsání parametrů uvedeny i energetické hustoty hmotnostní a volumetrická. Ty výrobci standardně neuvádí a jsou dopočítány podle následujících vztahů. Výpočet byl proveden pro první řádek. V rovnici (1) je uveden zjednodušený výpočet pro množství energie uložené v akumulátoru E_1 [Wh]. V rovnici (2) je pak uveden vztah pro hmotnostní energetickou hustotu ρ_m [Wh/kg]. U_1 je zde nominální napětí článku, C_1 minimální kapacita a m_1 hmotnost článku. Za povšimnutí stojí fakt, že hodnota překračuje oblast vyznačenou v Obr. 33, tedy od vytvoření tohoto grafu došlo a stále dochází k vylepšení parametrů.

$$E_1 = U_1 \cdot C_1 = 3,6 \cdot 3 = 10,8 \text{ Wh} \quad (1)$$

$$\rho_m = \frac{1}{m_1} \cdot E_1 = \frac{1}{0,048} \cdot 10,8 = 225 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \quad (2)$$

Pro výpočet volumetrické energetické hustoty ρ_v [Wh/l] (4) bylo nutné nejdříve spočítat objem jednoho článku V_1 [mm³] (3). Objem je zjednodušený a nepočítá s propojením článků, jejich držáky apod. d_1 a l_1 jsou průměr a délka článku.

$$V_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot l_1 = \frac{\pi \cdot 18^2}{4} \cdot 65 = 34510,4 \text{ mm}^3 \quad (3)$$

$$\rho_v = \frac{1}{V_1} \cdot E_1 = \frac{1 \cdot 10^6}{34510,4} \cdot 10,8 = 653 \frac{\text{Wh}}{\text{l}} \quad (4)$$

Nejlépe z hlediska energetické hustoty tedy vychází články HG2 od výrobce LG, rozměru 18650. Je zde ale ještě jeden parametr, který je také důležitý, a to maximální proud, který je článek schopený dodávat. Tento parametr je nutné sledovat i při výběru regulátoru a motorů. Celý systém motor – regulátor – akumulátor musí být navržen tak, aby tyto proudy, potažmo výkony zvládl. V kapitole 5.1 bude popsán výběr elektromotoru, který má maximální odebíraný proud 45 A. S přihlédnutím k tomuto parametru byl nakonec vybrán článek o rozměru 21700 s označením P42A od výrobce Molicel. Ten nabízí energetickou hustotu nižší než HG2, rozdíl ale není tak propastný jako u článku výrobce Lithium Werks s chemií LiFePO_4 .

Pro další vývoj bylo nutné zvolit konfiguraci zapojení. To opět souvisí i s elektromotory a jejich regulátory, které budou popsány v dalších kapitolách. Velmi častá je konfigurace 10 článků v sérii, která znamená nominální napětí 36 V celého akumulátoru. Objevují se i systémy s dvanácti a více články v sérii, to jsem ale pro naše použití považoval za zbytečně výkonné a velké řešení. Problém totiž nastává s přidáváním kapacity, kdy s každou další paralelní větví roste celkový počet o počet článků v sérii. Pro příklad, při dvanácti člancích v sérii a dvou paralelních větvích je celkový počet 24 článků, při třech paralelních je to 36 článků. Při deseti člancích v sérii a třech paralelně jde pouze o 30 článků. Protože články Molicel P42A nabízí relativně velkou kapacitu 4000 mAh, byla zvolena konfigurace 10 článků v sérii a pouze 2 paralelně. Nominální napětí U_{celk} [V] a nominální kapacita C_{celk} [Ah] jsou spočteny v rovnici (5) a (6). V rovnici (7) je spočtena celková energie uložená v akumulátoru E_{celk} [Wh]. V rovnici (8) je uveden špičkový výkon $P_{\text{max.celk}}$ [W], který je možné z akumulátoru odebírat. Očekávaný dojezd by se mohl pohybovat okolo 25-30 km. U_m je nominální napětí článku, C_m minimální kapacita, I_{max} maximální odebíraný proud. s_m a p_m jsou počty článků v sérii a paralelně.

$$U_{\text{celk}} = U_m \cdot s_m = 3,6 \cdot 10 = 36 \text{ V} \quad (5)$$

$$C_{\text{celk}} = C_m \cdot p_m = 4 \cdot 2 = 8 \text{ Ah} \quad (6)$$

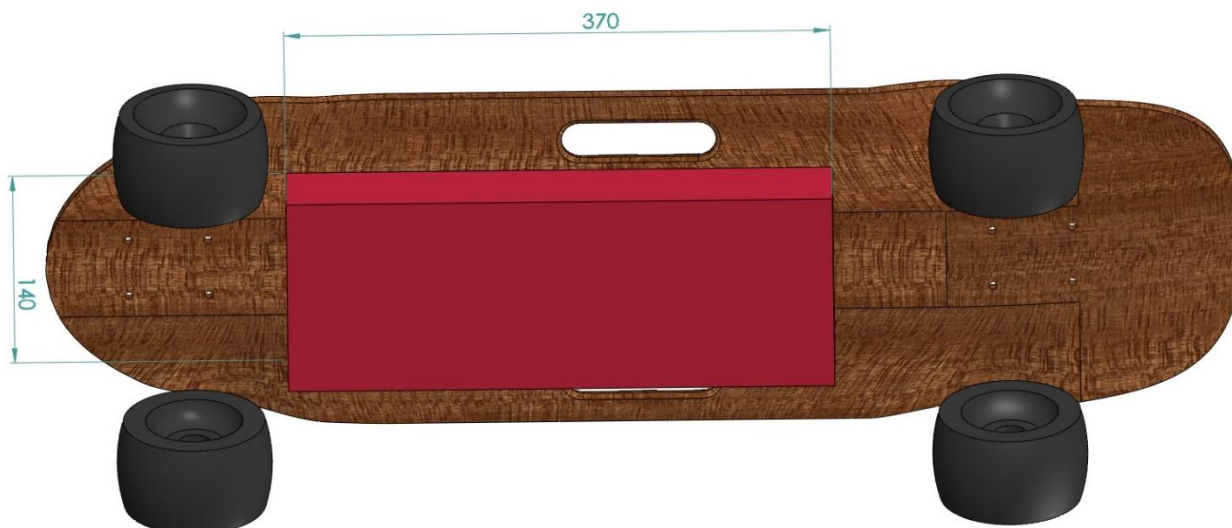
$$E_{\text{celk}} = U_{\text{celk}} \cdot C_{\text{celk}} = 3,6 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 2 = 288 \text{ Wh} \quad (7)$$

$$P_{\text{max.celk}} = U_{\text{celk}} \cdot I_{\text{max}} \cdot p_m = 3,6 \cdot 10 \cdot 45 \cdot 2 = 3240 \text{ W} \quad (8)$$

4.2 NÁVRH KRYTU AKUMULÁTORU

Hlavní funkcí krytu je chránit akumulátor proti mechanickému a jinému poškození za všech stavů používání. Sem patří i jízda za mokra a tím nutná voděodolnost krytu. Relativně náročným požadavkem je spojení voděodolnosti se snadnou výměnou. Někteří výrobci volí cestu zabudovaného akumulátoru do desky, který je jednodušší takto zaizolovat proti vodě. Výhoda výměnného akumulátoru je ale z hlediska e-boardu k dojíždění jasná – pro větší dojezd není nutné zvyšovat hmotnost celého e-boardu větším akumulátorem, náhradní je možné vzít s sebou jen v případě potřeby, a to jako zavazadlo.

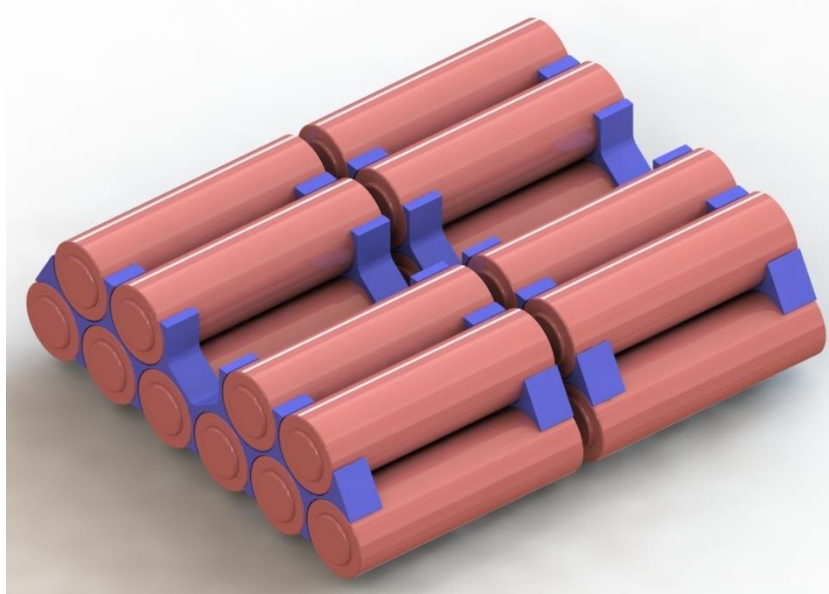
Kryt tedy bude kopírovat tvar článků akumulátoru. Na Obr. 34 je červeně znázorněn prostor využitelný pro veškerou elektroniku, tedy akumulátor i regulátor a jejich příslušenství. Jeho rozměry jsou brány jako maximální možné, vzhledem k velikosti desky, maximální poloze kol při zatáčení a prostoru pro hnací ústrojí. Tím vznikne kvádr o rozměrech 370x140 mm, hluboký 50 mm. Hloubka by mohla být i větší, ale je takto nastavená kvůli průjezdu nerovností na vozovce, světlá výška ke krytu takto činí 67 mm. Prostor pro regulátor byl předběžně určen jako kvádr o rozměrech 170x140x50 mm.



Obr. 34 Maximální možný prostor pro kryt akumulátoru a regulátoru pod deskou

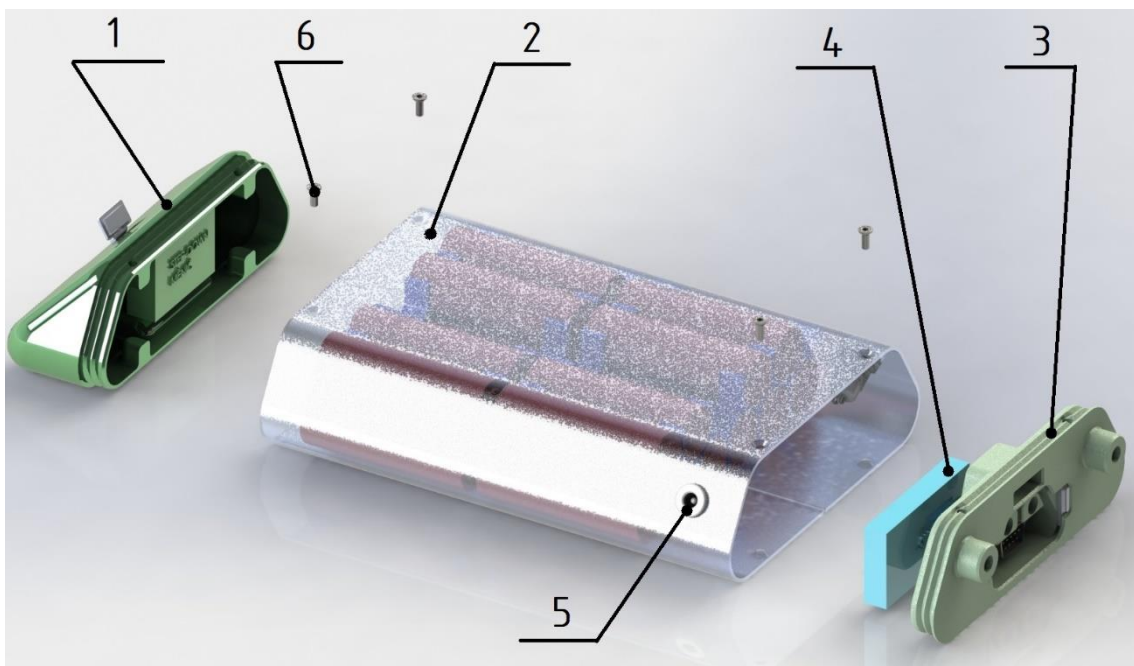
Články je možné naskládat více způsoby, nakonec byla zvolena varianta, kdy budou naskládány ve dvou patrech, v prvním 6 článků a v druhém 4. Tím vznikne segment 5s2p a články budou tvořit lichoběžníkový tvar. Spojením 2 segmentů vznikne akumulátor o velikosti 10s2p. Na Obr. 35 je možné vidět takovouto konfiguraci, články jsou zde vyznačeny červeně a modře je zde distanční vložka, která bude držet články v požadovaném tvaru a zároveň zabráni dotyku. To je důležité hlavně z důvodů chlazení a tvoří to i důležitý bezpečnostní prvek. Tyto vložky budou vytisknuty na FDM tiskárně, kvůli použití přímo v akumulátoru budou ze samozhášivého materiálu splňující normu UL-94 V0 [49].

Rozpracována byla i varianta z článků 18650, které nabízí menší rozměry i hmotnost. Pro představu, hmotnost čistě článků 21700 v 10s2p konfiguraci je 1440 g. V případě použití např. VTC6 článků je tato hmotnost 960 g. Rozdíl je tedy znatelných 480 g. Takový akumulátor ale nenabízí výkon ani kapacitu jako 21700, proto bylo dále počítáno s původní variantou.



Obr. 35 Konfigurace článků 10s2p poskládaná do finálního tvaru, modře distanční vložky. Polarita článků zde zatím není řešena

Po zvolení prostorového uspořádání článků bylo možné navrhnout kryt. Na Obr. 36 jsou hlavní části krytu akumulátoru, které budou dále popsány.



Obr. 36 Hlavní části akumulátorového krytu; 1 – přední víko, 2 – plechové tělo, 3 – zadní víko, 4 – BMS, 5 – konektor nabíjení, 6 – šrouby M3

Pozice 1 – přední víko. Bude vytištěna opět FDM tiskárnou, budou v ní uloženy světla, USB port pro nabíjení dalších zařízení a step-down měnič, který slouží pro snížení napětí z akumulátoru na 5 V. V přední části bude umístěn i konektor pro připojení k případným senzorům.

Pozice 2 – plechové tělo. Tvoří střední a hlavní nosnou část, vyrobena bude z ohýbaného hliníkového plechu tloušťky 1,5 mm. Vytváří pevnou ochranu a současně může fungovat jako pasivní chladič.

Pozice 3 – zadní víko. Slouží k uzavření celého krytu, ale hlavně bude obsahovat kontakty pro propojení akumulátoru s regulátorem. To vše navíc musí být dobře utěsněno, pro tento účel je zde uvažováno použití 2 O-kroužků za sebou, které budou onu vodotěsnost zajišťovat. O-kroužky jsou použity i na těsnění předního i zadního krytu k plechovému tělu. Tento díl bude vytištěn na FDM tiskárně.

Pozice 4 - BMS (Battery Management System). Slouží k řízení spotřeby a nabíjení akumulátoru a tvoří jeden z nejdůležitějších nejen bezpečnostních prvků akumulátoru.

Pozice 5 – konektor nabíjení. Umístěn z boku na plechovém těle. Zakrytý gumovou krytkou pro zajištění voděodolnosti. Symetricky na druhé straně je umístěno tlačítko pro zapínání/vypínání světel.

Pozice 6 – šrouby M3. 8 šroubů sloužících pro spojení předního a zadní víka s plechovým tělem.

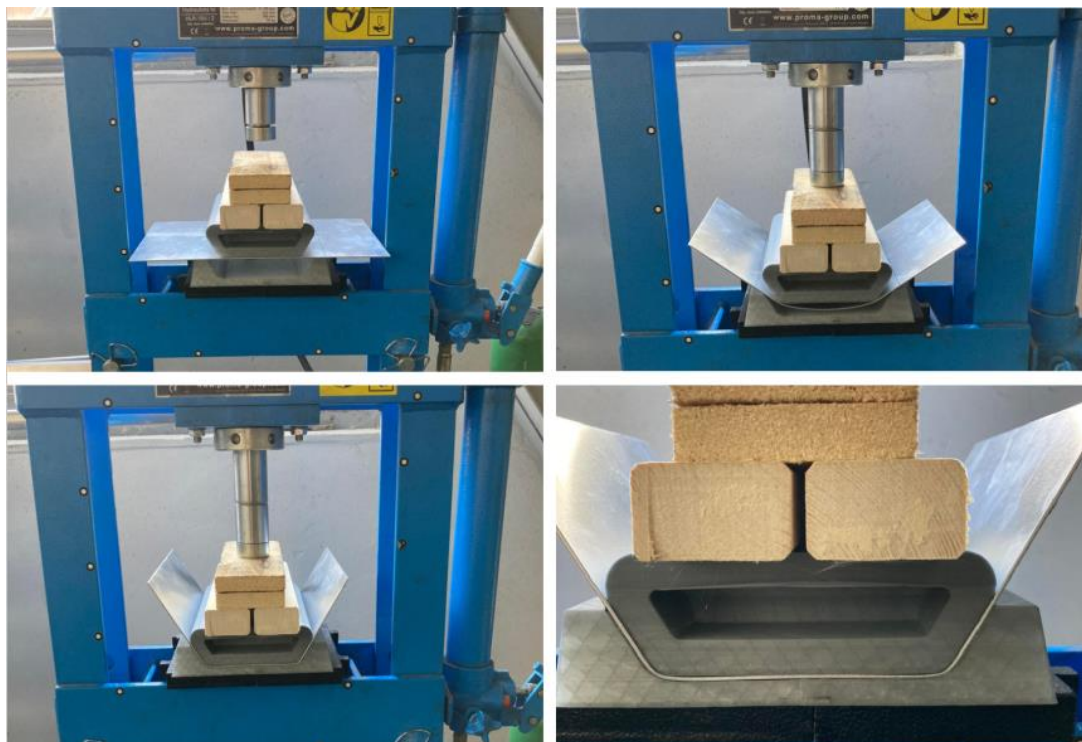
4.3 VÝROBA AKUMULÁTORU

Spojení článků je realizováno pomocí niklových plechových pásků. Ještě předtím bylo nutné spárovat články v paralelním zapojení. Jednotlivé články byly postupně nabity a vybity, aby se zjistila jejich skutečná kapacita a změřen jejich vnitřní odpor. Následně byly spárovány články s nejbližší kapacitou, vnitřní odpory byly u všech velmi podobné. Na Obr. 37 jsou již spojené články bodovým svařováním. Všechny jsou pro jistotu spojeny šesti body.



Obr. 37 Ukázka spojení bodovým svařováním článků pomocí niklových pásků

Na Obr. 38 je vidět výroba plechového těla akumulátoru. Je vyroben pomocí hydraulického lisu na ruční pohon a forem zajišťujících potřebný tvar. Formy jsou, kvůli výrobě pouze jednoho kusy, vyrobeny pomocí FDM tisku. Další dva ohyby byly vykonány ručně. Stejným postupem bylo vyrobeno plechové tělo regulátoru, které je ale o polovinu kratší.

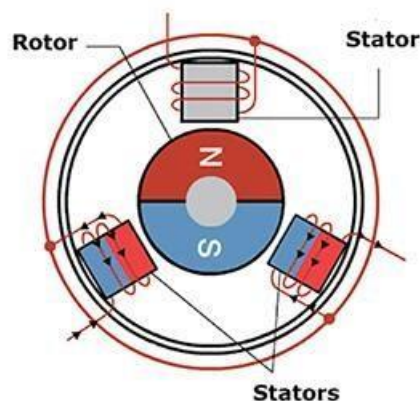


Obr. 38 Tváření plechového těla pomocí hydraulického lisu

5 NÁVRH REGULÁTORU

Regulátor (nebo také invertor) slouží pro řízení energie z akumulátoru do elektromotorů. Má velký vliv na celkový pocit z jízdy, jelikož umožňuje měnit i křivky zrychlení a zpomalení motorů. Za menší komplikaci lze považovat fakt, že oproti většině dopravních prostředků není jezdec (řidič) pevně usazen ve vozidle, dokonce se ani nemá čeho držet a v průběhu celé jízdy musí držet rovnováhu. To klade opravdu velké nároky na předvídatelné chování pohonu a odezvy na plyn i brzdu, hlavně u brzdění není možné brzdit ihned plným výkonem. Všichni soudobí výrobci mají obvykle 3-5 různých nastavení přepínatelných ovladačem, které omezují maximální rychlost ale i akceleraci a brzdění. Tím je možné se jednak na e-boardu naučit jezdit, ale i vybrat nastavení podle stylu jízdy apod.

Regulátor je úzce vázán s elektromotorem, kapitola 6.1 se bude zabývat výběrem elektromotoru na principu BLDC. Jde o zkratku Brushless Direct Current, což volně přeloženo je bezkartáčový stejnosměrný motor. Z hlediska regulátoru bych zde rád uvedl princip jeho fungování a tím i řízení regulátorem. Jako většina elektromotorů se i BLDC skládá z rotoru a statoru. Na Obr. 39 můžeme vidět klasické uspořádání, tedy stator s permanentními magnety ve středu a vinutí na statorovém plášti. Princip fungování spočívá v postupném napájení 2 cívek, čímž je vyvoláno pootočení rotoru. V dalším kroku je napájena další dvojice cívek a děj takto pokračuje čímž dojde k souvislému otáčení. Rychlost otáčení se ovládá frekvencí změny napájení jednotlivých dvojic. Podobně funguje stejnosměrný kartáčový motor, ten však tyto změny zajišťuje mechanicky pomocí komutátoru, BLDC má komutování řízené elektronicky [50]. Problematika řízení je velmi obsáhlá a uvedený princip je zjednodušený pro pochopení. Další kroky tedy budou směřovat k výběru vhodného regulátoru.

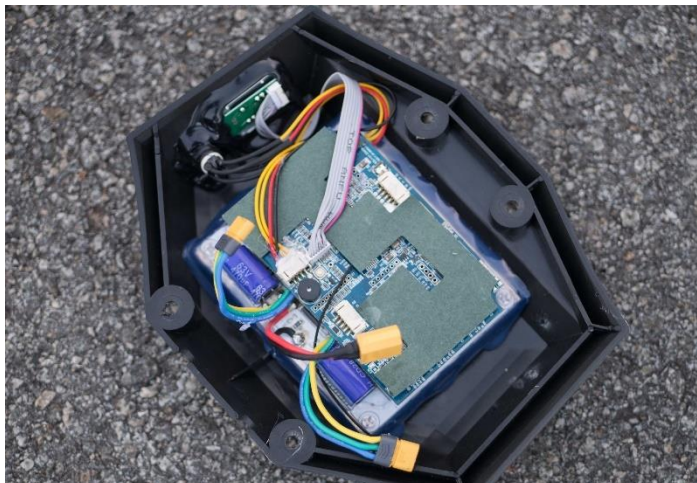


Obr. 39 Schéma BLDC motoru [50]

5.1 VÝBĚR REGULÁTORU

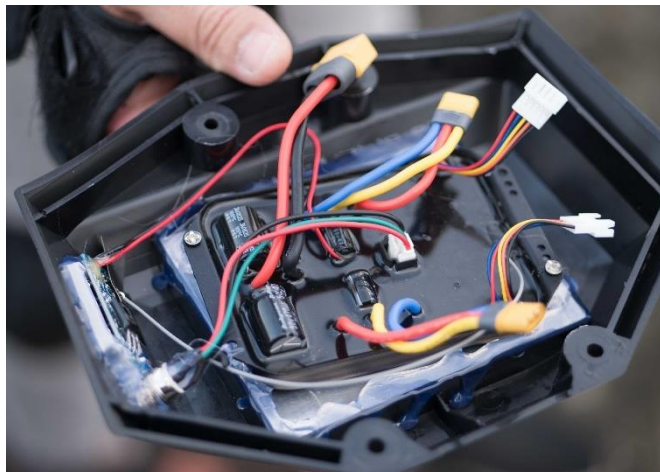
Na trhu existuje mnoho řešení, v posledních letech se zejména v segmentu středně výkonných e-boardů ustálily 3 hlavní zástupci.

Prvním z nich je čínský LingYi ESC, (zkratka ESC – Electronic Speed Control) který lze vidět na Obr. 40. Vyniká zejména cenou ale ani dosahované maximální výkony nejsou špatné, je však kritizován za méně přesné ovládání, a to hlavně ve verzi pro BELT pohon. Výhodou je možnost zapnutí samotným pootočením jednoho z kol, v praxi je tedy třeba zapnout jen ovladač a samotný e-board se zapne při prvním odrazu nohou. Používá se zejména v nejlevnějších modelech a speciálně u pohonů HUB.



Obr. 40 LingYi ESC s krytem [51]

Dalším zástupcem je Hobbywing ESC (Obr. 41). Ten můžeme najít i u dražších modelů, většina výrobců si upravuje jeho software, aby pasoval přímo na jejich pohonné ústrojí. Jednotlivé verze se ale liší i použitým hardwarem a lze u nich pozorovat výkonové rozdíly. Preciznost ovládání je obecně lépe hodnocená, chybí ale funkce zapnutí pomocí pootočení kol. Ta je vykompenzována funkcí jakéhosi spánku, kdy se regulátor zapne se zapnutím ovladače. Další výhodou je možnost zakoupit jej ve voděodolné verzi. Všechny součástky jsou zality speciální hmotou, to jednak zvyšuje tepelnou vodivost a zamezuje styku s vodou. Není to ale dokonalé řešení, protože samotné součástky chráněné jsou ale konektory zde použité nikoliv.



Obr. 41 Hobbywing ESC s krytem [51]

Posledním používaným typem je Vedder ESC (zkráceně VESC). Jde o zechaťátku open-source projekt, dnes již patentovaný pod výrobcem Trampa [X]. Jde o jednu z dražších variant, velkou výhodou jsou ale velké maximální výkony, a hlavně ohromné množství nastavení. K tomuto účelu je možné si zakoupit i software VESC Tool. Že jde o opravdu zdařilý projekt svedčí i fakt, že vzniklo spoustu variant, které se už nejmenují VESC, ale vychází z něj. Např. výrobce Enertion prodává svojí verzi pod názvem FOCBOX nebo Flipsky jako FSFESC.



Obr. 42 VESC 6 Mk V [51]

Konečná volba padla na Hobbywing ESC. Velkou výhodou oproti VESCu je jeho snadná montáž. Hobbywing totiž nabízí toto řešení v jednom s přijmačem (spárovaným s ovladačem) i zapínáním/vypínáním akumulátoru. To nabízí i LingYi, na rozdíl od něj ale vyniká precizním ovládním.

5.2 NÁVRH KRYTU REGULÁTORU

Stejně jako kryt akumulátoru, je i kryt regulátoru tvořen ze třech hlavních částí. Tělo tvoří ohýbaný hliníkový plech tloušťky 1,5 mm, který zároveň bude tvořit pasivní chladič. Zde je tato funkce ještě důležitější než u akumulátoru, jelikož zde je předpokládáno ještě větší zahřívání, už jen proto že všechna energie dodávaná motorům prochází přes relativně malý regulátor. Jak již bylo řečeno, akumulátor bude výměnný, ale regulátor a jeho kryt budou přimontovány k desce bez možnosti lehké demontáže. Na Obr. 43 lze vidět hlavní součásti krytu regulátoru a dále budou popsány jednotlivé pozice a jejich účel.

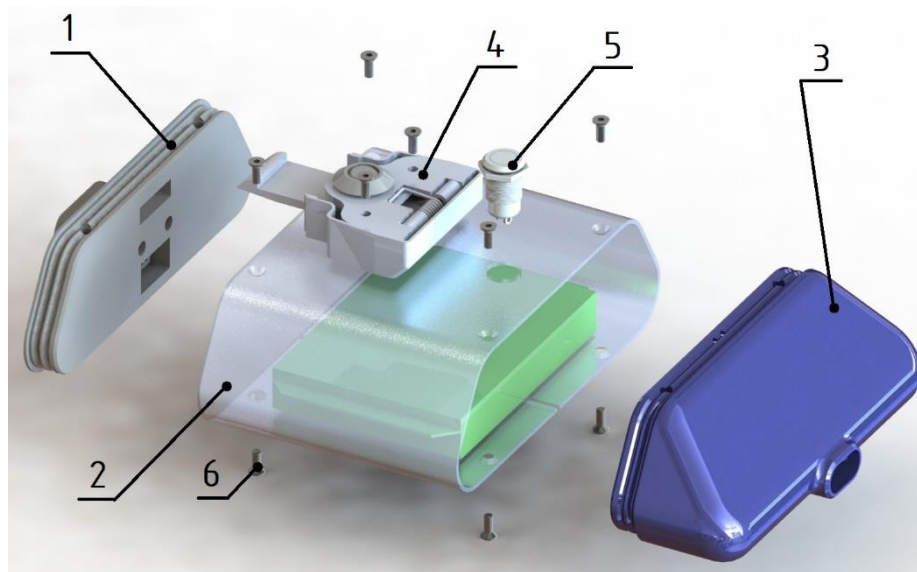
Pozice 1 – přední víko. Kromě uzavření krytu z jedné strany je v něm umístěný konektor pro připojení k akumulátoru a dále konektor pro připojení případných senzorů. Tento díl bude vytištěn na FDM tiskárně.

Pozice 2 – tělo krytu regulátoru. Zde bude umístěn samotný regulátor a pomocí nýtovacích matic a šroubů bude připevněn k desce.

Pozice 3 – zadní víko. Uzavírá tělo a obsahuje otvor, přes který povedou kabely k elektromotorům. Jako přední víko i tento díl bude vyroben na FDM tiskárně.

Pozice 4 – mechanismus zámku. Jde o pružinový mechanismus, který bude držet akumulátor. Po zmáčknutí tlačítka bude západka posunuta a bude umožněno jeho vytažení. Konstrukčně náročnější bylo zajistit, aby se případná voda nedostala dovnitř krytu ani přes tento mechanismus. Proto je tlačítko utěsněno opět O-kroužkem a celý návrh počítá s ochranným obalem kolem mechanismu. Pokud by se tato varianta v praxi neosvědčila, byla vymodelována druhá, která počítá se zajištěním akumulátoru v jeho přední části pomocí závlačky.

Na Obr. 44 je znázorněna sestava krytu akumulátoru a regulátoru na desce. Ve zbývajícím prostoru mezi kryty a zadní nápravou bude umístěno hnací ústrojí.



Obr. 43 – Krypt regulátoru; 1 – přední víko, 2 – tělo krytu regulátoru, 3 – zadní víko, 4 – mechanismus zámku, 5 – vypínač, 6 – šrouby M3.



Obr. 44 – Sestava krytu akumulátoru a regulátoru na desce

6 NÁVRH HNACÍHO ÚSTROJÍ

Posledním celkem a zároveň hlavním cílem této práce je návrh hnacího ústrojí. Konceptně byla zvolena varianta pohonu pomocí ozubeného řemene (BELT). Pohon bude umístěn na zadní nápravě a z důvodů zachování těžiště co nejvíc ve středu desky (pro případné nošení) budou elektromotory umístěné před zadním truckem. Dalším rysem bude použití dvou elektromotorů, kdy každý bude pohánět jedno zadní kolo. Toto řešení se přímo nabízí a je využívané napříč celou elektromobilitou včetně některých osobních aut. Díky tomu že otáčení kol není nijak spjato, není potřeba mechanický diferenciál. Navíc v případě závodních speciálů se nabízí zajímavé možnosti řízení při průjezdu zatáčkou. Elektromotory je ale třeba nějak připevnit a jelikož u longboardů obecně jsou zatáčecí obě nápravy, musí být elektromotor připevněn k hangeru. Obr. 45 znázorňuje jednoduché schéma jedné poloviny pohonu. Dále budou popsány jednotlivé pozice a jejich funkce.

Pozice 1 – kolo. Je uvažováno od Discovery 105 mm od výrobce Cloudwheels, tato volba by měla zajišťovat pohodlnou jízdu i po méně kvalitní vozovce.

Pozice 2 – Řemenice. Bude přenášet výkon a moment od ozubeného řemene na kolo. Díky předepnutí řemenu a přenášeným silám musí být uložena na ložisku z jedné strany, z druhé bude zasunuta do středu kola.

Pozice 3 – hanger. Tato součást bude součástí nakupovaného trucku.

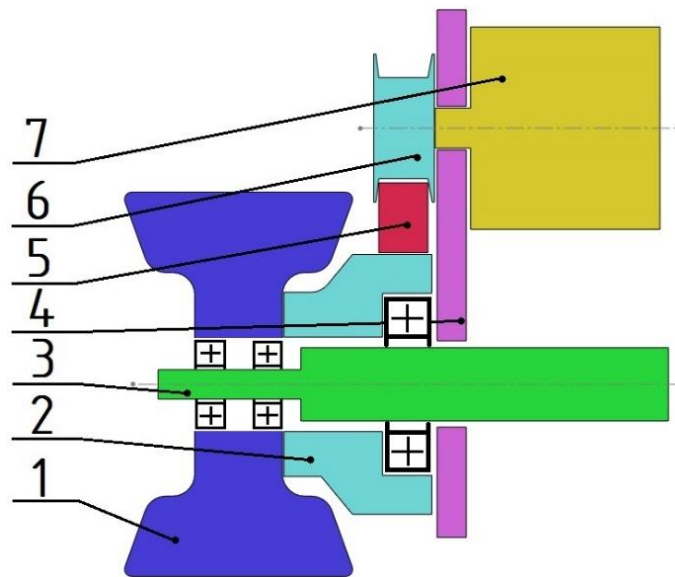
Pozice 4 – držák motoru. Slouží pro držení elektromotoru v požadované osové vzdálenosti od řemenice. Motor v ní musí být uložen posuvně tak, aby bylo možné zajistit montáž a napnutí řemenu.

Pozice 5 – ozubený řemen. Přenáší výkon a moment z pastorku na řemenici. S ohledem na zástavbové rozměry a přenášené výkony a momenty byl zvolen ozubený řemen s roztečí zubů 5 mm a profilem HTD.

Pozice 6 – pastorek. Bude uložen na hřídeli elektromotoru a zajištěn proti protáčení a axiálnímu posuvu. I tento díl bude nakupovaný.

Pozice 7 – elektromotor. Jeho délka bude omezena rozměrem hangeru a bližším výběrem se bude zabývat kapitola 6.1.

K výpočtu převodového poměru a navržení celého ústrojí je třeba znát přesný rozměr elektromotoru a jeho výkonové parametry. Další kapitoly tedy budou věnovány jeho výběru a měření.



Obr. 45 Schéma poloviny hnacího ústrojí; 1 – kolo, 2 – řemenice, 3 – hanger, 4 - držák motoru, 5 -ozubený řemen, 6 – pastorek, 7 – elektromotor.

6.1 VÝBĚR ELEKTROMOTORU

Výběr elektromotoru komplikuje velké množství výrobců, jejich rozměrů a výkonových parametrů. Z principů fungování se dnes používá výhradně BLDC elektromotor v konfiguraci outrunner. To znamená že statorová část, která obsahuje vinutí, je ve středu a rotační plášť obsahující magnety tvoří rotor. Toto řešení nabízí větší momenty ale tím, že statorové vinutí je uzavřeno uvnitř těla elektromotoru, nelze k němu jednoduše přidat chladič jako u inrunneru a celý motor je tím obtížnější uchladiť. V Tabulka 11 jsou uvedeni 3 vybraní zástupci, kteří budou dále zkoumání. Je třeba dodat že rozměrů je daleko více a rozhodujícím faktorem pro výběr byla délka těla motoru. Kvůli uvažovaným truckům, které mají standartní rozměr kolem 180 mm není možné použít motory delší jak přibližně 60 mm. Průměrově byly zvoleny řady o rozměrech 50 a 63 mm. Větší se u BELT pohonů ani nepoužívají. Na Obr. 46 můžete vidět příklad značení elektromotorů



Obr. 46 – Příklad značení BLDC elektromotoru 6355 160KV

Tabulka 11 Vybrané parametry srovnávaných motorů

Označení motoru	Max. proud [A]	Hmotnost [g]	Max. výkon [W]	Max. moment [Nm]
5055 200KV	39	475	1380	1,1
6355 160KV	45	572	1620	1,9
5070 270KV*	55	450	2200	-

*údaje o tomto motoru nelze ověřit, již se nevyrábí. Skutečná délka i přes označení 5070 je 59 mm

Jak lze vidět z Tabulka 11, motory se liší svými rozměry a dále parametrem, který značí počet otáček na 1 V. Zvolení ale jen podle maximálních hodnot výkonů a momentů by nebylo dostatečné. Jak již bylo řečeno tyto motory mají sice ohromný výkon vzhledem ke své velikosti, ale tím jsou zároveň velmi náchylné k přehřívání zejména při dlouhodobějším použití. Dále bylo důvodné podezření a nedůvěra k pravdivosti těchto parametrů, protože záleží na výrobci a jeho způsobu měření. Ke správnému zvolení elektromotoru bylo za cíl stanoveno změřit momentovou a výkonovou charakteristiku a vývoj teploty při dlouhodobějším běhu v zatížení. Byly proto nakoupeny další 2 elektromotory, a všechny 3 lze vidět na Obr. 47.

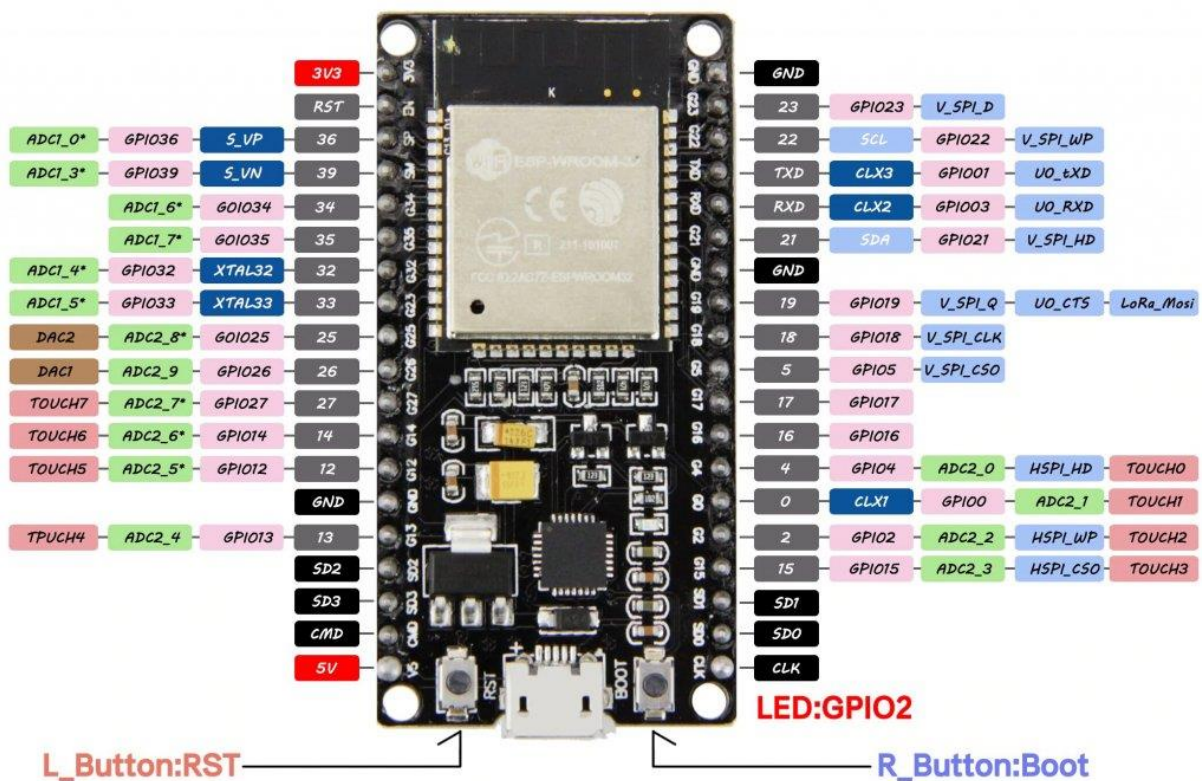


Obr. 47 – Zakoupené elektromotory určené k dalšímu testování, zleva 5070 270KV, uprostřed 6355 160KV a napravo 5055 200KV.

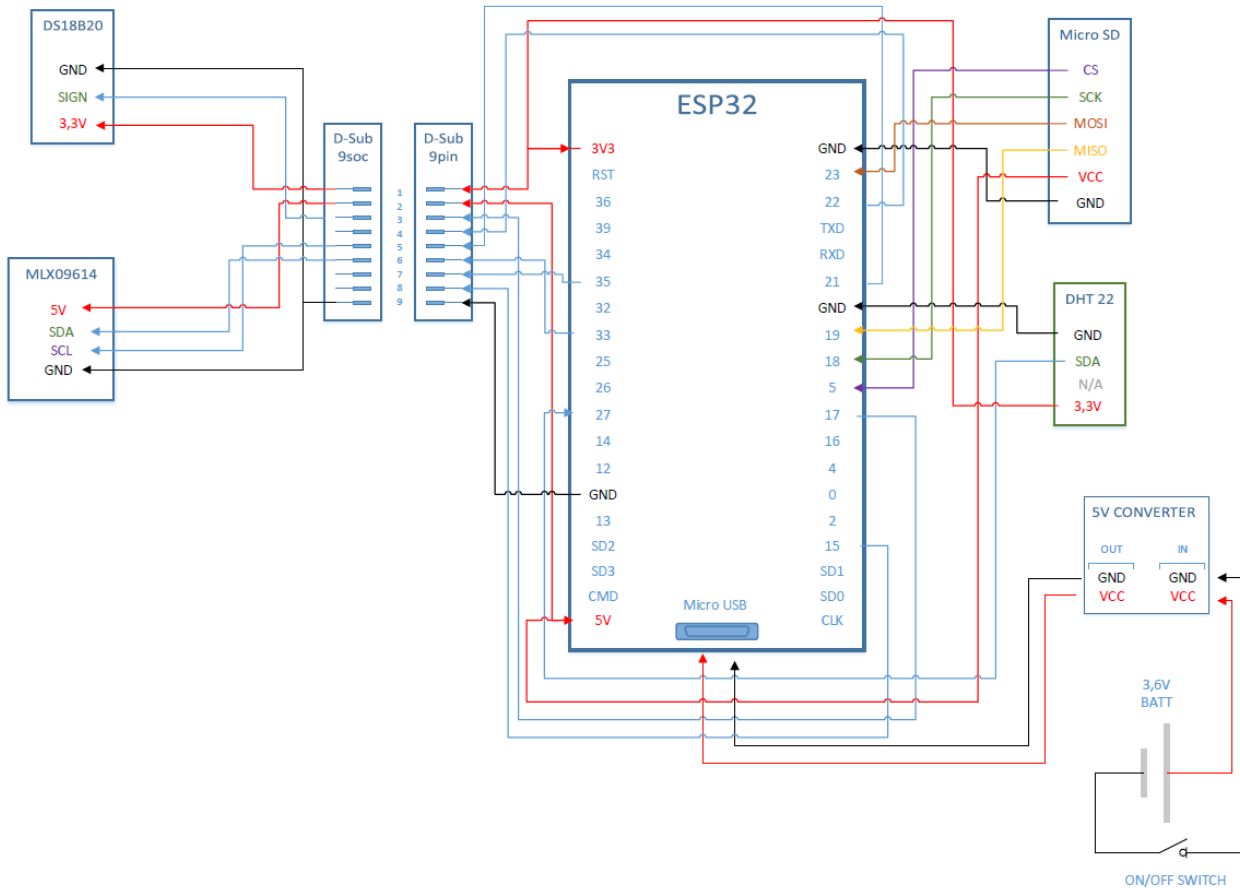
6.1.1 VLASTNÍ DATALOGGER

Pro účely měření průběhů teplot a dalších veličin bylo nutné vytvořit vlastní datalogger. Kvůli snadné úpravě kódu, cenové dostupnosti, a hlavně obrovské uživatelské základně bylo zvoleno řešení pomocí prototypové desky ESP32 (Obr. 48). Jde o vývojovou desku s mikrokontrolerem a oproti známějšímu modelu od Arduina, např. Arduino UNO, je v základu vybaven Wifi modulem a větší FLASH a SRAM pamětí pro složitější aplikace [52].

Celý systém je navržen tak aby pracoval samostatně, má tedy i svůj vlastní akumulátor a funguje následovně. Po přepnutí spínače je napájen napěťový měnič, který vytvoří napětí 5 V nutné pro funkci ESP32. To se automaticky připojí k internetu pomocí předem definovaných klíčů k Wifi síti (vytvořené např. pomocí mobilního hotspotu). Tím se запиše datum a čas měření a začne sběr dat ze senzorů a ukládání na paměťovou kartu typu microSD. Zároveň jsou data odesílána do mobilní aplikace Blynk, kde lze velmi snadno pomocí přednastavených bloků vytvořit grafické rozhraní a vidět tak data v téměř reálném čase. Data jsou ukládána a odesílána do okamžiku vypnutí, poté s nimi jde pracovat po stažení z microSD karty, kam se ukládají ve formátu .csv.



Obr. 48 ESP32 s označením funkce jednotlivých pinů [52]



Obr. 49 – Schéma zapojení pro měření teploty motoru na standu

Schéma zapojení bylo vytvořeno v programu Microsoft Visio a na Obr. 49 je se všemi senzory potřebnými k měření jednotlivých motorů a v Tabulka 12 jsou jejich vybrané parametry. Dohromady jde o 4 senzory, které je možné dále rozšiřovat až do zaplnění devíti pinového konektoru typu D-sub. Dále jsou uvedeny důvody výběru a jejich účel.

DHT 22 – jde o sdružený senzor teploty a vlhkosti okolního vzduchu [53]. Slouží pro získání podmínek, za jakých probíhá měření. Oproti předchůdci DHT 11 poskytuje mnohem vyšší přesnost. Odezva je několik sekund ale u senzoru tohoto typu to je dostačující. Komunikace probíhá pomocí sběrnice one-wire.

DS18B20 – jde o digitální senzor teploty a byl vybrán jako alternativa k NTC termistoru [54]. Oproti němu nabízí zapojení až přibližně padesáti senzorů na jeden komunikační vodič (opět sběrnice one-wire), což umožňují unikátní adresy každého senzoru už od výroby. To se velmi hodí zejména pro možnost zapojení dalších senzorů v budoucnu, a to bez potřeby zabírání analogových pinů pro každý zvlášť. Další výhodou je relativně velká přesnost, a to i bez nutnosti kalibrace. Nevýhodou je odezva 750 ms při nejvyšší přesnosti, není tedy vhodný pro aplikace, kde dochází ke skokovým změnám. Bude použit pro měření průběhu teploty na statoru.

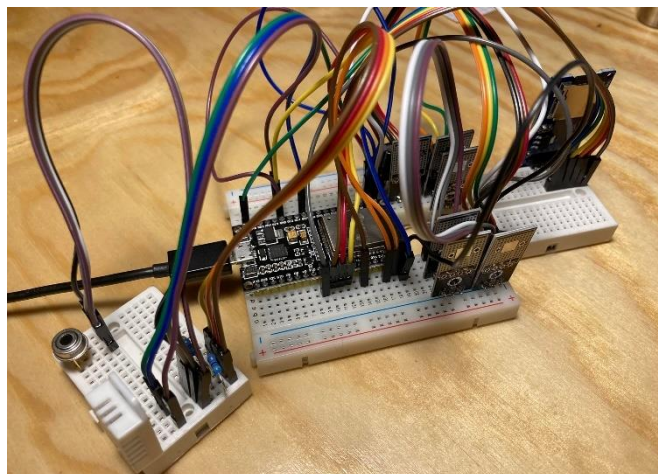
Tabulka 12 Vybrané parametry použitých senzorů

Označení senzoru	Měřená veličina	Popis	Přesnost	Rozsah
DHT 22 [53]	teplota	digitální teplotní senzor	nejvýše $\pm 0,5$ °C	-20 až +80 °C
DHT 22 [53]	vlhkost	kapacitní snímač vlhkosti	± 2 % při 25 °C	0 až 100 %
DS18B20 [54]	teplota	digitální senzor teploty	$\pm 0,5$ °C od -10 do +85 °C	-55 až 125 °C
MLX09614* [55]	teplota	bezkontaktní infračervený senzor teploty	$\pm 0,5$ °C při pokojové teplotě	-70 až 385 °C

*hodnoty přesnosti a rozsahu jsou uvedeny pro snímání objektu

MLX09614 – je bezkontaktní infračervený senzor teploty, umí snímat i teplotu vzduchu ale zde bude využit pro snímání teploty rotoru [55]. Díky otáčení celého rotorového pláště ji nebylo možné měřit kontaktně. Nabízí velmi rychlou odezvu i velký rozsah měřených teplot a dobrou přesnost. Problémem obecně u všech senzorů tohoto typu je ale právě v přesnosti, protože velmi záleží na materiálu objektu a jeho povrchové úpravě, protože to má velký vliv na danou emisivitu. V praxi takto nelze měřit např. silně odrazivé povrchy ale i ty, které jsou černé můžou mít různé hodnoty. Pro měnitelnou emisivitu by bylo třeba použít daleko dražší senzory, proto naměřené hodnoty teplot budou brány spíše jako informativní a mezi sebou porovnatelné, skutečná teplota ale může být značně jiná. Komunikace probíhá pomocí I2C sběrnice.

Poté se ve schématu nachází kromě samotné vývojové desky ESP32 i 5V step-up měnič pro napájení a microSD modul. Poslední jmenovaný slouží pro ukládání hodnot ze všech senzorů a jeho komunikace probíhá po sběrnici SPI. Ověření funkčnosti celého systému proběhlo po zapojení na nepájivém kontaktním poli (Obr. 50).

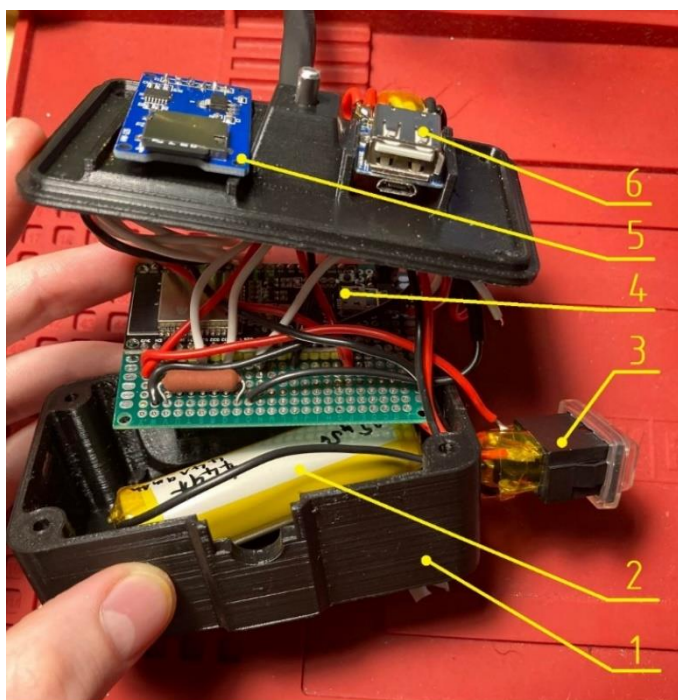


Obr. 50 – Zapojení Dataloggeru v nepájivém poli.

Po mnoha úpravách bylo třeba navrhnout a vyrobit ochranný box. Tento box obsahuje 2 oddělené komory, v první se nachází samotné ESP32 v pájivém poli, akumulátor a jednotlivé vodiče, v druhé microSD modul a napěťový měnič. K těmto dvěma komponentám je totiž nutný přístup kvůli vyjmutí SD karty a nabíjení Li-ion akumulátoru, které také zajišťuje napěťový měnič. Ochranu proti nečistotám představuje víko nad druhou komorou, které je zajištěno závlačkou. Celý box v probíhající výrobě lze vidět na Obr. 51.

Mobilní aplikaci Blynk je na Obr. 51, kde bylo zkoušeno hned 6 digitálních senzorů DS18B20. Blynk je možné otevřít také v prohlížeči na počítači, kde nabízí ještě větší možnosti správy a nastavení, např. změnu barvy písma, pokud hodnota přesáhne zadanou mez.

Co se týče samotného kódu, jeho ukázka je na Obr. 52. Jde o začátek, kde je třeba definovat všechny použité knihovny a proměnné, čísla pinů apod. Jak lze vidět, všechny použité senzory již měli vytvořenou svoji knihovnu, nebylo tedy nutné programovat komunikaci od nuly. To je opravdu velká výhoda, díky které se Arduino komunita neustále rozšiřuje. Celý kód zabral přibližně 500 řádků.



Obr. 51 a) – Rozpracovaný Datalogger s boxem; 1 – dolní kryt, 2 – 21700 Li-ion článek, 3 – spínač, 4 – ESP32, 5 – microSD modul, 6 – napěťový měnič s Li-ion nabíječkou., b) Ukázka mobilní aplikace Blynk.

Soubor Úpravy Projekt Nástroje nápověda

```
Long_temp_measure_v6-jetsurf$
1 #define BLYNK_TEMPLATE_ID " "
2 #define BLYNK_DEVICE_NAME "Quickstart Template"
3
4 #define BLYNK_PRINT Serial // Enables Serial Monitor
5 #include <SPI.h>
6 #include <OneWire.h>
7
8 #include <WiFi.h>
9 #include <WiFiClient.h>
10 #include <BlynkSimpleEsp32.h>
11 #include <DallasTemperature.h>
12
13 #include "FS.h"
14 #include "SD.h"
15 #include <NTPCClient.h>
16
17 #include "DHT.h"
18
19 #include <Adafruit_MLX90614.h>
20 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
21
22 // PINOUT
23 #define SD_CS 5
24 #define DHTPIN 27
25 #define DHTTYPE DHT22
26 const int oneWireBus = 17; // define DS18B20 digital temp sensor
```

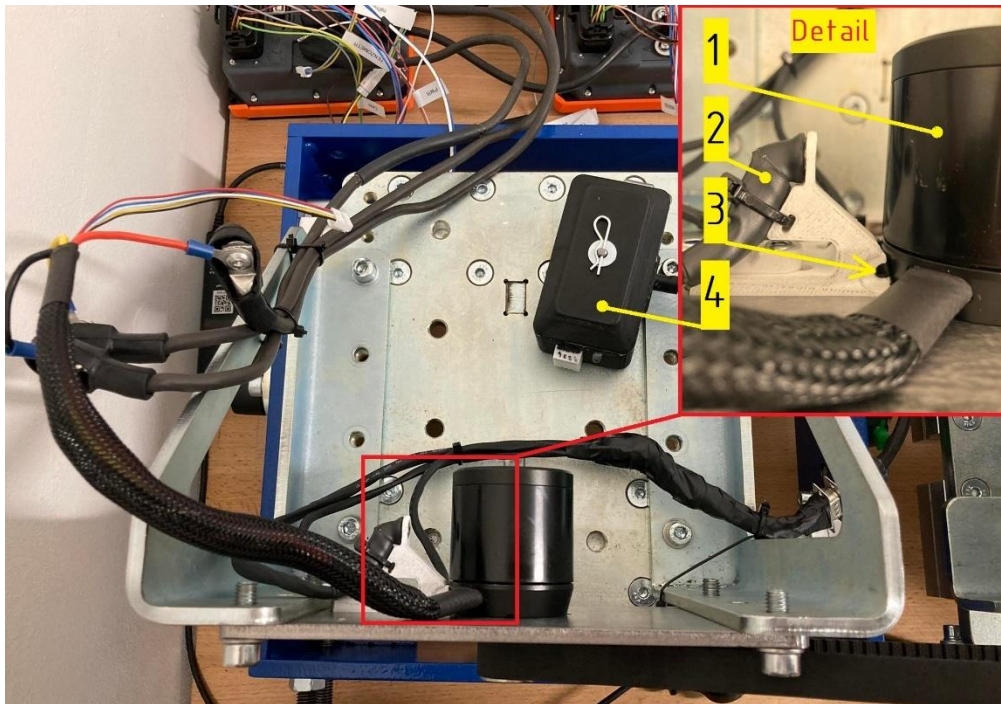
Obr. 52 Ukázka kódu vytvořená v programu Arduino IDE

6.1.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK MOTORŮ

Měření probíhalo ve firmě Jetsurf, tento výrobce totiž disponuje vybavením pro měření takto malých elektromotorů. Před samotným měřením bylo nutné vyrobít několik přípravků. První byl nosný plech, ve kterém jsou otvory s roztečí pro všechny 3 motory, 2 z nich měli tento rozměr stejný. Dále je na plechu umístěn přípravek pro držení senzoru teploty statoru a rotoru. Přenos mezi měřeným motorem a generátorem je pomocí ozubeného řemenu, na Obr. 53 lze vidět měřící stand pro brždění elektromotorů.

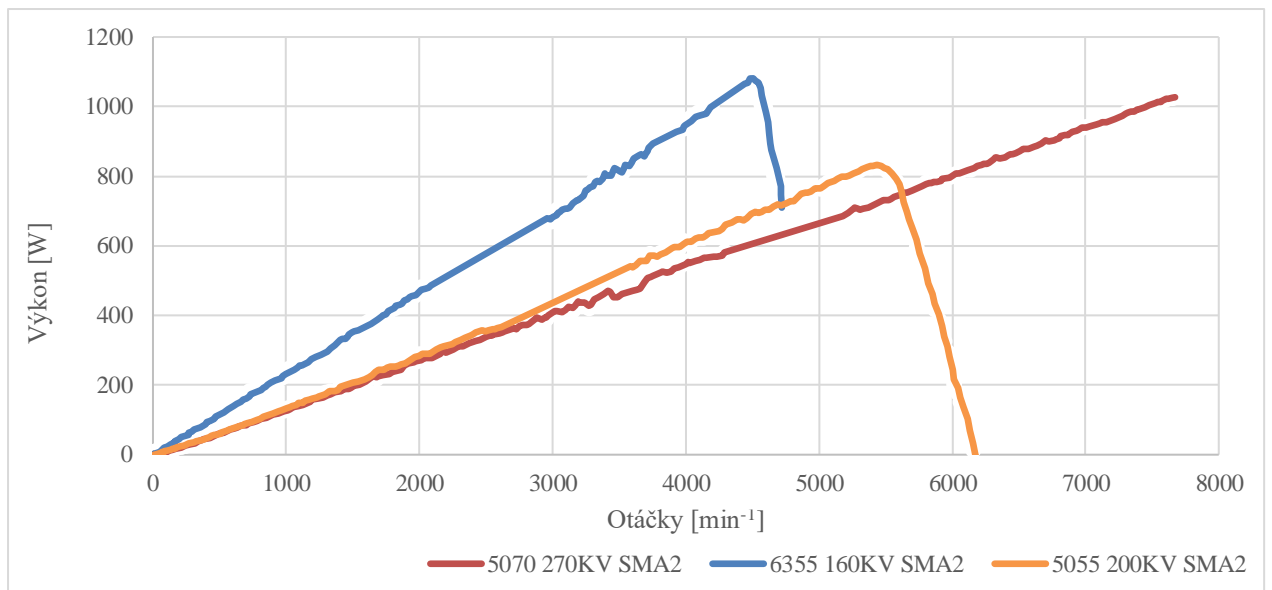


Obr. 53 – Stand pro brždění elektromotorů, nalevo měřený motor, napravo generátor.



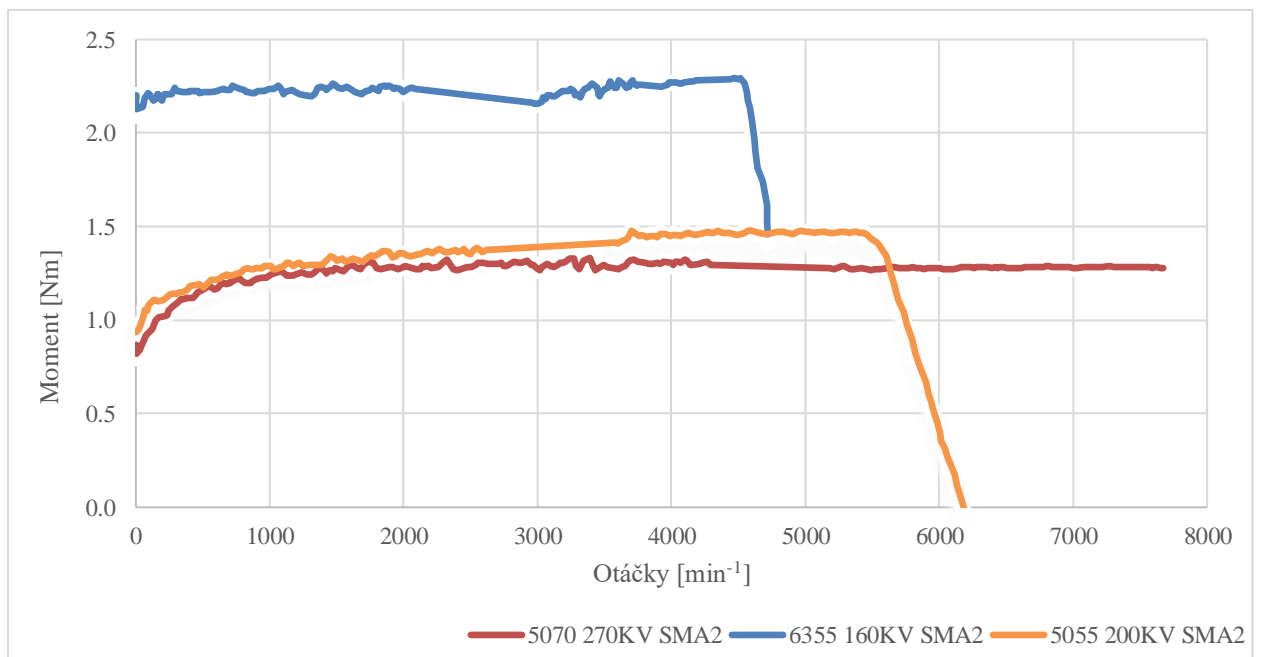
Obr. 54 Detail měřícího standu; 1 – měřený elektromotor, 2 – Bezkontaktní senzor pro měření teploty rotoru, 3 – Digitální senzor teploty statoru, 4 – Datalogger

Samotné měření se skládá ze dvou částí. V první části byly změřeny výkonové a momentové charakteristiky, toto měření probíhalo za pomoci předem nastaveného programu a nebyly přítomny měření teploty. Důvodem byla délka tohoto měření, které probíhalo přibližně 30 s a za tuto dobu by došlo jen k velmi malé změně teplot. Proto následovala ještě další část, kdy byl motor konstantně zatížen momentem 1 Nm a otáčkami 2500 min⁻¹ po dobu 3 min. Původně měl tento test běžet 6 min ale hned u prvního motoru došlo k překročení teploty 80 °C na rotoru ještě před skončením této doby, proto byl test přerušen a u dalšího motoru zkrácen na pouze 3 min. Před každým motorem bylo nutné zadat jeho hlavní parametry jako počet pólů, počet otáček na 1 volt, převodový poměr mezi motorem a generátorem a maximální dodávaný proud. Řídící systém brzdy si tyto hodnoty ověřil a např. u počtu otáček na 1 V u všech motorů naměřil o 20 až 40 otáček na 1 V nižší, než uvádí výrobce. Takto bylo tedy možné změřit hlavní parametry motoru, bohužel ale tento konkrétní brzdící stand nebyl navržen pro použití vlastního regulátoru, takže přesná odezva motor + regulátor změřená nebyla.

První část měření

Obr. 55 Výkonové charakteristiky jednotlivých motorů

Na Obr. 55 lze vidět průběhy výkonů u všech 3 elektromotorů. Výkon dle očekávání stoupá téměř lineárně až do maximálního rozsahu otáček a poté strmě padá dolů. Za povšimnutí stojí motor 5070 270KV, který nemá v grafu klesající část. To je díky napěťovému omezení od výrobce, který motor doporučuje provozovat na maximální napětí přibližně 30 V. Všechny elektromotory ale napájíme napětím 36 V, které uvažujeme u akumulátoru. Proto byl tento motor omezen jednak proudově ale i maximálními otáčkami, které jsou nastaveny na hranici, jakou by měl při napájení napětím 30 V. Směrnice těchto výkonových křivek jsou dány parametrem počtu otáček na 1 V.



Obr. 56 Momentové charakteristiky jednotlivých motorů

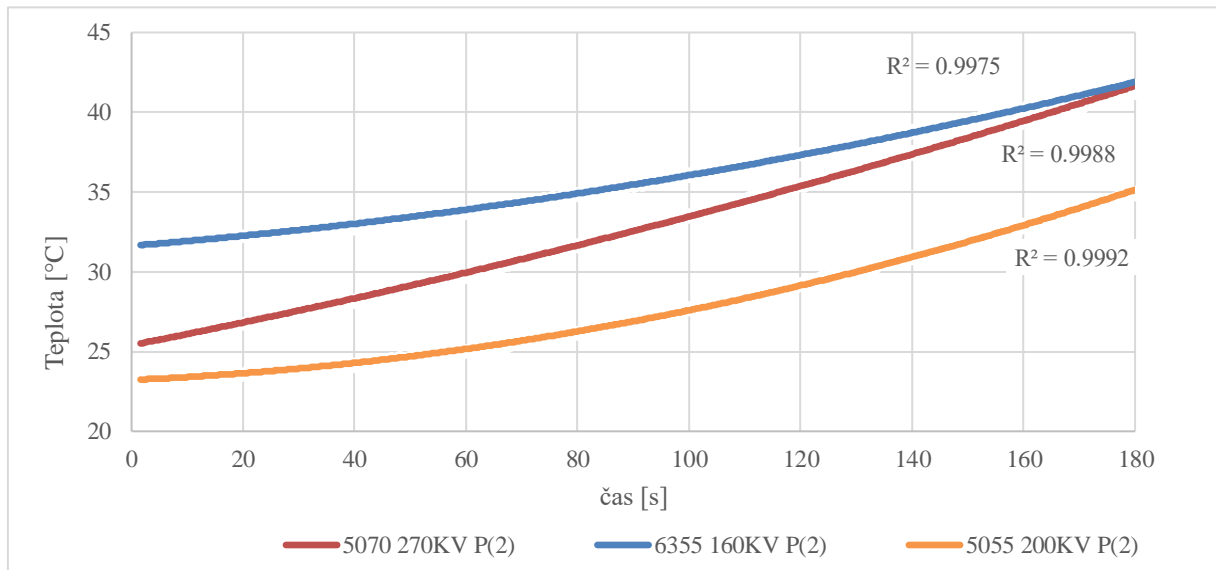
U dosažených momentů na Obr. 56 se motory liší daleko razantněji než u výkonů. Je zde velký rozdíl mezi motorem 6355 160KV a dalšími dvěma. U tohoto motoru dosahuje moment hodnoty 2,2 Nm již v nulových otáčkách a svoji hodnotu mírně zvyšuje až na 2,3 Nm, kde končí jeho použitelné spektrum otáček. Naproti tomu motory 5070 270KV a 5055 200KV vykazují v nulových otáčkách přibližně 60 % svého maximálního momentu, a postupně tuto hodnotu zvyšují až v průběhu vyšších otáček. Motor 5055 200KV vykazuje stoupající trend až do svého maximálního rozsahu otáček. Motor 5070 270KV má své maximum při otáčkách přibližně 3200 min^{-1} a dále jen mírně klesá až do 7600 min^{-1} . Lze zde se zaujetím pozorovat že i motory pracující na stejném principu a rozměrově velmi blízké se mohou ve svých charakteristikách velmi lišit. Zažitá představa o elektromotorech a jejich vlastnosti, že v nulových otáčkách mají nejvyšší moment, zde neplatí ani u jednoho a 2 ze 3 se tomu ani neblíží.

V jednotlivých křivkách na Obr. 55 a Obr. 56 si také lze všimnout vyhlazených částí, v těchto místech došlo k velkému rozkmitu hodnot, které musely být vyjmuty a nahrazeny přímkou. Při měření se to projevovalo jako nenadálý hluk, který následně ustal. Nejpravděpodobnějším důvodem je chvilkové přeskočení ozubeného řemene vlivem nedostatečného předepnutí. Dalším mohlo být neúplné nastavení všech konstant elektromotoru a tím jeho nedokonalé řízení.

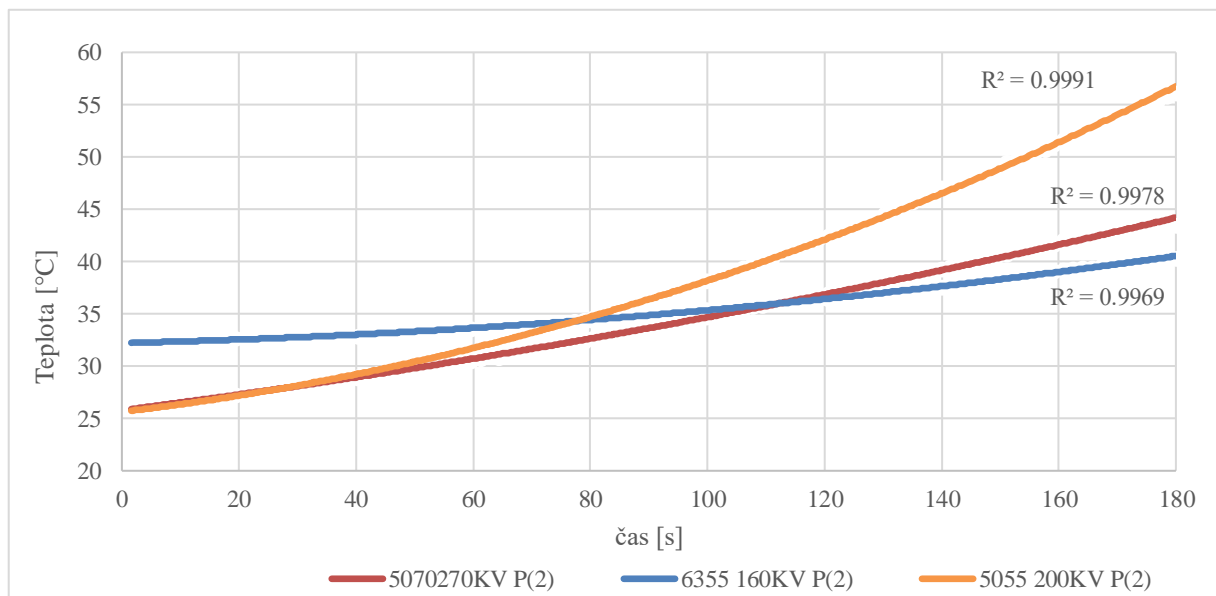
Co se týče porovnání hodnot udávaných výrobcí a naměřenými hodnotami, panuje zde velký nesoulad. V případě výkonů jsou rozdíly opravdu propastné. Je třeba dodat že naměřený výkon je snížen účinností převodu ozubeným řemenem, ale i po přidání 20 % se hodnoty velmi liší. Pro příklad, motor 6355 160KV má dosahovat 1620 W, naměřené maximum je ale pouhých 1087,6 W. S ohledem na účinnost převodu a přidáním 20 % je ale hodnota stále jen 1305,1 W. To znamená stále o 19 % nižší výkon, než je udávaný výrobcem. V případě momentů je situace opačná, naměřené momenty jsou o několik desetín Nm větší, než je udávaná hodnota. To může být způsobeno nepřesnou kalibrací tenzometrického snímače, protože ten je navržen a kalibrován pro momenty až několik desítek Nm.

Druhá část měření

V této části se nejvíce projevila velikost jednotlivých motorů a také úroveň zatížení. Podmínky měření byly, jak již bylo řečeno, pro všechny stejné a konstantní – zátěž momentem 1 Nm, otáčkami 2500 min⁻¹ a dobou trvání 3 min. Měření teplot probíhalo na 2 místech, jedno na statorové části, druhé na rotorové. Přípravek na držení senzorů (Obr. 54) byl navržen tak, aby bylo možné jej posouvat, a tedy nastavit vždy do stejné vzdálenosti pro všechny průměry motorů.



Obr. 57 Průběh teploty statorů



Obr. 58 Průběh teploty rotorů

Na Obr. 57 i Obr. 58 lze vidět, že jednotlivé průběhy teplot nevychází ze stejné počáteční hodnoty. Ač bylo snahou dělat mezi měřeními jednotlivých motorů přestávky tak, aby stihl vychladnout nosný plech, časové možnosti to ne zcela dovolily. Proto jsou výsledky hůře porovnatelné a lépe se nám bude pracovat s rozdíly teplot v Tabulka 13.

Tabulka 13 Rozdíl teplot na statoru a rotoru

Označení motoru	Rozdíl teplot na statoru [°C]	Rozdíl teplot na rotoru [°C]
5055 200KV	11,5	29,7
6355 160KV	9,5	7,98
5070 270KV	15,31	17,2

Za povšimnutí stojí různé poměry teplot rotoru a statoru. Obecně nejvíce ztrát a tím odpadního tepla vzniká u elektromotorů ve vinutí, tedy ve statoru. Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety, ale ty sami o sobě teplo nevytváří. Tím, že jde o motory s rotačním pláštěm, je stator uzavřen a jeho chladicí možnosti jsou značně omezené. Teplo se může odvádět vedením pouze do nosného plechu na čelní straně motoru anebo zářením a mírně vedením přes ložiska do rotorového pláště. Výrobci se ještě snaží pomoci odvodu tepla různými otvory na konci rotoru, kterými by měl při otáčení proudit vzduch. V tomto ohledu nejhorší elektromotor, co se týče chlazení byl model 5055 200KV. Ten sice disponuje pěti chladicími otvory, ty jsou ale umístěny přímo na zadní stěně, což se ukázalo jako velmi neefektivní řešení. To více otáčkový motor 5070 270KV je měl umístěné také na konci ale radiálně na válcové části a naměřené hodnoty dopadly o hodně lépe. Zatímco u 5055 200KV je rozdíl teplot mezi rotorem a státorem téměř 20 °C, u 5070 270KV jsou to pouze necelé 2 °C. Oba ale mají vyšší teplotu na rotoru. Nejlépe dopadl motor 6355 160KV a důvody jsou 2. První je, že tento motor má ze všech největší průměr, a i o pětinu větší hmotnost, má tedy vyšší akumulaci schopnosti než 2 předešlé. Druhým důvodem, který také hraje velkou roli je úroveň zatížení. Tento motor má maximální moment 2,3 Nm, zátěž 1 Nm tedy činí necelých 44 % jeho maxima. V případě motoru 5055 200 KV je ale zátěž 1 Nm téměř 68 % jeho maximálního momentu.

Konečnou volbou je tedy motor 6355 160KV. Disponuje nejvyšším momentem, který je téměř konstantní v celém spektru otáček a dále vychází nejlépe z hlediska chlazení. Oba rozdíly teplot jsou velmi malé, a rozdíl mezi státorem a rotorem je pouhých 1,52 °C s vyšší hodnotou u statoru. Jeho nevýhodou je větší hmotnost oproti ostatním a vyšší zástavbové nároky.

6.2 VÝPOČET PŘEVODOVÉHO POMĚRU

Tento výpočet bude závislý na volbě maximální rychlosti. Většina výrobců dnes volí maximální rychlost mezi 35 až 50 km/h. Vzhledem k menšímu rozvoru oproti delším longboardům byla maximální rychlost v_{max1p} zvolena 40 km/h, případně 37 km/h pro pomalejší variantu v_{max2p} . Hodnota maximálních otáček byla odečtena z měření ($n_{max.motor} = 4518 \text{ min}^{-1}$), v těchto otáčkách má motor nejvyšší moment. S dalším přidáváním otáček se jeho hodnota prudce snižuje ale např. při jízdě z kopce, kdy jsou sníženy jízdní odpory bude možné dosáhnout vyšší rychlosti. Kola jsou uvažována Cloudwheels Discovery 105D s průměrem $D_{kola} = 105 \text{ mm}$. Počet zubů pastorku ($z_p = 15$) je určen vyráběnou řemenicí s dírou ve tvaru D, která umožňuje přenos točivého momentu.

$$n_{kola1p} = \frac{v_{max1p}}{\pi \cdot D_{kola}} = \frac{\frac{40}{3,6}}{\pi \cdot 0,105} = 33,68 \text{ s}^{-1} = 2020,8 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

$$n_{kola2p} = \frac{v_{max2p}}{\pi \cdot D_{kola}} = \frac{\frac{37}{3,6}}{\pi \cdot 0,105} = 31,16 \text{ s}^{-1} = 1869,6 \text{ min}^{-1} \quad (10)$$

$$i_{1p} = \frac{n_{max.motor}}{n_{kola1p}} = \frac{4518}{2020,8} = 2,24 \quad (11)$$

$$i_{2p} = \frac{n_{max.motor}}{n_{kola2p}} = \frac{4518}{1869,6} = 2,42 \quad (12)$$

$$z_{1p} = z_p \cdot i_{1p} = 15 \cdot 2,24 = 33,6 \quad (13)$$

$$z_{2p} = z_p \cdot i_{2p} = 15 \cdot 2,42 = 36,3 \quad (14)$$

Po výpočtech předběžných rychlostí kol a převodových poměrů pro obě varianty (rovnice 9 až 12) bylo třeba počty zubů řemenice (rovnice 13 a 14) zaokrouhlit na celá čísla ($z_{1,2s}$) a vypočítat skutečné hodnoty rychlostí $v_{max1,2s}$, otáček $n_{kola1,2s}$ a převodových poměrů $i_{1,2s}$.

$$i_{1s} = \frac{z_{1s}}{z_p} = \frac{33}{15} = 2,2 \quad (15)$$

$$i_{2s} = \frac{z_{2s}}{z_p} = \frac{36}{15} = 2,4 \quad (16)$$

$$n_{kola1s} = \frac{n_{max.motor}}{i_{1s}} = \frac{4518}{2,2} = 34,23 \text{ s}^{-1} = 2053,6 \text{ min}^{-1} \quad (17)$$

$$n_{kola2s} = \frac{n_{max.motor}}{i_{2s}} = \frac{4518}{2,4} = 31,38 \text{ s}^{-1} = 1882,5 \text{ min}^{-1} \quad (18)$$

$$v_{max1s} = \pi \cdot D_{kola} \cdot n_{kola1s} = \pi \cdot 0,105 \cdot 34,23 = 11,29 \frac{m}{s} = 40,6 \frac{km}{h} \quad (19)$$

$$v_{max2s} = \pi \cdot D_{kola} \cdot n_{kola2s} = \pi \cdot 0,105 \cdot 31,38 = 10,35 \frac{m}{s} = 37,3 \frac{km}{h} \quad (20)$$

V rovnicích (15) až (18) jsou spočteny skutečné převodové poměry a otáčky kol. V rovnicích (19) a (20) jsou ověřeny maximální rychlosti, které se neliší o víc jak 0,6 km/h oproti těm předběžným. U varianty 1 byl počet zubů z_{1s} nelogicky zaokrouhlen dolů, tato malá odchylka byla udělána v zájmu o větší odlišení obou variant. Dále zbývá ještě výpočet hnacího momentu $M_{1,2}$ a hnací síly od motoru $F_{1,2}$ v rovnicích (21) až (24). Pro výpočty byla použita hodnota maximálního momentu $M_{max.motor} = 2,3 \text{ Nm}$ a mechanická účinnost řemenového převodu $\eta_{řemen}$ byla zvolena 0,96.

$$M_1 = M_{max.motor} \cdot i_{1s} \cdot \eta_{řemen} = 2,3 \cdot 2,2 \cdot 0,96 = 4,86 \text{ Nm} \quad (21)$$

$$M_2 = M_{max.motor} \cdot i_{2s} \cdot \eta_{řemen} = 2,3 \cdot 2,2 \cdot 0,96 = 5,30 \text{ Nm} \quad (22)$$

$$F_1 = \frac{M_1}{\frac{D_{kola}}{2}} = \frac{4,86}{\frac{0,105}{2}} = 92,57 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_2 = \frac{M_2}{\frac{D_{kola}}{2}} = \frac{5,3}{\frac{0,105}{2}} = 100,95 \text{ N} \quad (24)$$

Hnací momenty v rovnicích (21)

(22) i hnací síly v rovnicích

(23) a (24) jsou spočteny pouze pro jeden motor, celkové momenty a síly jsou tedy jejich dvojnásobkem.

6.3 NÁVRH ŘEMENE

Dále bylo nutné navrhnout požadovanou délku řemene a pro tento účel byl využit program ContitechMultistarter od výrobce Continental (Obr. 59). Po zadání počtů zubů na řemenicích, osově vzdálenosti, typu řemene a požadované šířky program vybere nejbližší normalizovaný řemen. S ohledem na přenášené výkony a momenty byl vybrán řemen s profilem HTD a roztečí 5 mm, i protože v tomto rozměru se vyrábí pastorky na motor. Předběžná osová vzdálenost byla zvolena 70 mm, s ohledem na zástavbové rozměry a úhel opásání pastorku. Program poté navrhl řemen s délkou 265 mm a upravil osovou vzdálenost na 66,64 mm. Úhel opásání pastorku (malé řemenice) je potom 150,96°, což znamená 6,29 zubů v záběru. Velkou výhodou je že lze snadno výpočet upravit i pro variantu 1, tedy s velkou řemenicí o počtu zubů $z_1=33$. Osová vzdálenost je v tomto případě 71,05 mm. Výpočet počítá i správné předpětí řemenu, které je u 2. varianty 227,96 N. Pro další výpočty byly zavedeny parametry osových vzdáleností $L_{w1,2}$ a celkových předepínacích sil $F_{p1,2}$ odečtené z programu ContitechMultistarter.

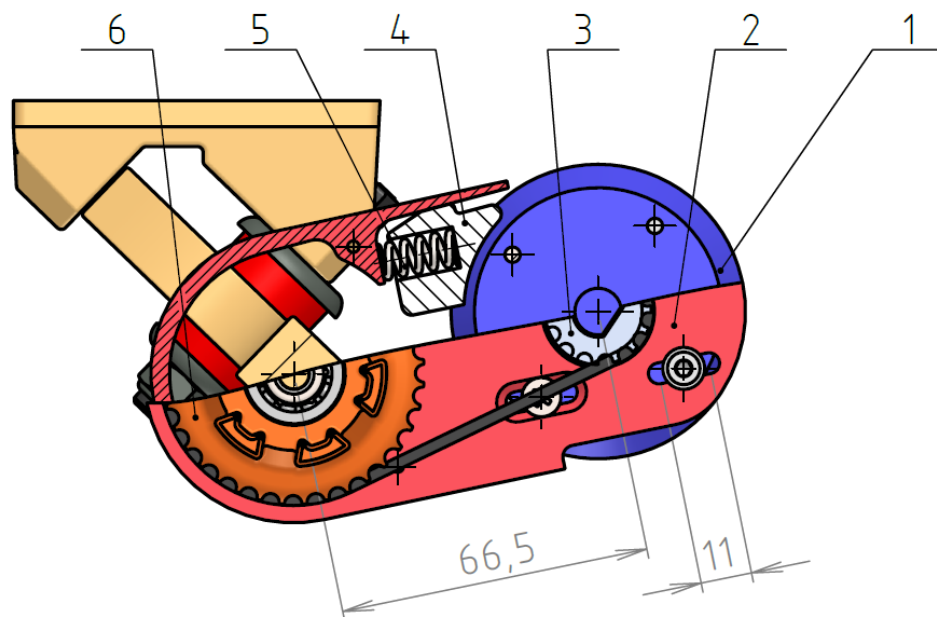
Continental		Výsledek	
CONTITECH			
Profil zubu	PROF	=	5M
Rozteč zubů	T	=	5.00 mm
Počet zubů malé řemenice	ZK	=	15
Účinný průměr malé řemenice	DWK	=	23.87 mm
Počet zubů velké řemenice	ZG	=	36
Účinný průměr velké řemenice	DWG	=	57.30 mm
Otáčky malé řemenice	NK	=	4518.00 1/min
Otáčky velké řemenice	NG	=	1882.50 1/min
Převodový poměr	I	=	2.40
Délka řemenu	IW	=	265.00 mm
Počet zubů řemenu	Z	=	53.00
Osová vzdálenost	AER	=	66.64 mm
Úhel opásání malé řemenice	BETA	=	150.96 grd
Počet zubů v záběru malé řemenice	ZE	=	6.29
Rychlost řemenu	V	=	5.65 m/s
Ohybová frekvence při provozu	BF	=	42.62 Hz
Celkový provozní součinitel	C0	=	1.00
Součinitel počtu zubů v záběru	C1	=	1.00
Součinitel délky	C5	=	0.80
Požadovaný přenášený výkon	P	=	1.08 kW
Krouticí moment na malé řemenici	MDK	=	2.28 Nm
Krouticí moment na velké řemenici	MDG	=	5.47 Nm
Vypočtená šířka řemenu	BERR	=	7.62 mm
Zvolená šířka řemenu	B	=	15.00 mm
Hodnota výkonu pro zvolenou šířku řemenu	PR	=	2.47 kW
Vypočtený celkový provozní součinitel	COER	=	2.29
Obvodová síla	FU	=	191.06 N
Statická síla ve větvi	FSTAT	=	117.74 N
Celková předepínací síla	FV	=	227.96 N
Součinitel zatížení předpětím	k1	=	1.00
Provozní součinitel předpětí	k2	=	1.23
Vlastní frekvence volné větve	EIF	=	372 Hz

Obr. 59 Protokol výsledku z programu ContitechMultistarter pro variantu 2, $z_2=36$

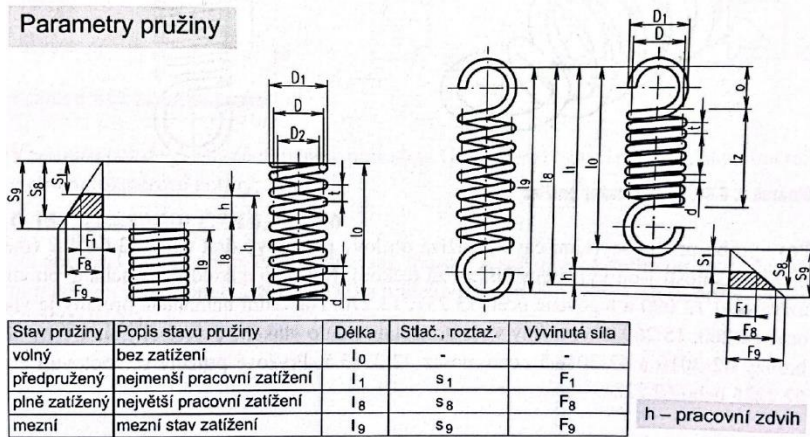
6.4 NÁVRH DRŽÁKU A UNAŠEČE

Po volbě elektromotoru bylo možné navrhnout držák a způsob jeho uchycení k trucku. Hlavní funkce držáku je kromě udržení motoru i zajistit předeptnutí řemenu. Pro tento účel musí být motor uložen v drážkách tak, aby bylo možné seřizovat jeho osovou vzdálenost od osy kol a tím řemen dopínat. Většina výrobců BELT pohonu dnes dopínání řemenu řeší správnou montáží, ale pro co nejmenší servisní náročnost byla zvolena koncepce rozšířená o tlačné pružiny. Ty nastaví správné předpětí během montáže, ale zajistí ho i v případě mírně povolených šroubů k motoru.

Na Obr. 60 lze vidět rozpracovanou sestavu hnacího ústrojí v polovičním řezu. Pozice 5 je tlačná šroubovitá pružina, která je z jedné strany pevně opřena o držák (pozice 2) a z druhé strany o posuvný doraz (pozice 4), který dále doléhá na tělo motoru (pozice 1) a tím je možné napínání. Dále si lze na Obr. 60 všimnout, že motor je uložen čtyřmi šrouby v drážkách, které mu umožňují měnit osovou vzdálenost o $\pm 5,5$ mm. Tím bude zaručena jednoduchá montáž, ale hlavně je tím umožněno měnit velké řemenice při zachování délky řemene. Následkem je změna osové vzdálenosti a uložení motoru v držáku musí tuto změnu dovolit.



Obr. 60 Poloviční řez rozpracovaným hnacím ústrojím; 1 – elektromotor 6355 160KV, 2 – držák motoru, 3 – pastorek $z_p=15$, 4 – doraz pružin, 5 – tlačná pružina, 6 – velká řemenice



Obrázek č. 8.66, Parametry šroubovitě pružiny tlačné a tažné

Obr. 61 Parametry pružiny, převzato z [56]

Výpočet pružin byl proveden pro 2. variantu velké řemenice, tedy $z_2=36$. Popis parametrů lze vidět na Obr. 61. Podle maximální možné zástavby byla vybrána pružina s průměrem drátu 1,4 mm, jejichž hlavní parametry můžete vidět v Tabulka 14.

Tabulka 14 Vybrané parametry tlačné pružiny [57]

Označení pružiny	Délka ve volném stavu L_0 [mm]	Délka v max. přípustném stlačení L_n [mm]	Tuhost c [N/mm]
D5520	28	15,7	11,18

$$\frac{F_{p2}}{2} = c \cdot s_2 \quad (25)$$

$$s_2 = L_0 - L_2 \quad (26)$$

$$L_2 = \frac{c \cdot L_0 - \frac{F_{p2}}{2}}{c} = \frac{11,18 \cdot 28 - \frac{227,96}{2}}{11,18} = 17,81 \text{ mm} \quad (27)$$

Rovnice (25) je obecné vyjádření síly od šroubovitě pružiny (síla je dělena 2 kvůli použití 2 pružin). Rovnice (26) je vyjádření stlačení odečtením délky ve volném a napjatém stavu. A nakonec v rovnici (27) je spočtena délka pružiny při nejmenším pracovním zatížení, při kterém obě pružiny dohromady působí silou rovnou síle předpětí. V rovnicích (28),)

(29)

a

(30) jsou tyto hodnoty analogicky spočteny pro variantu 1.

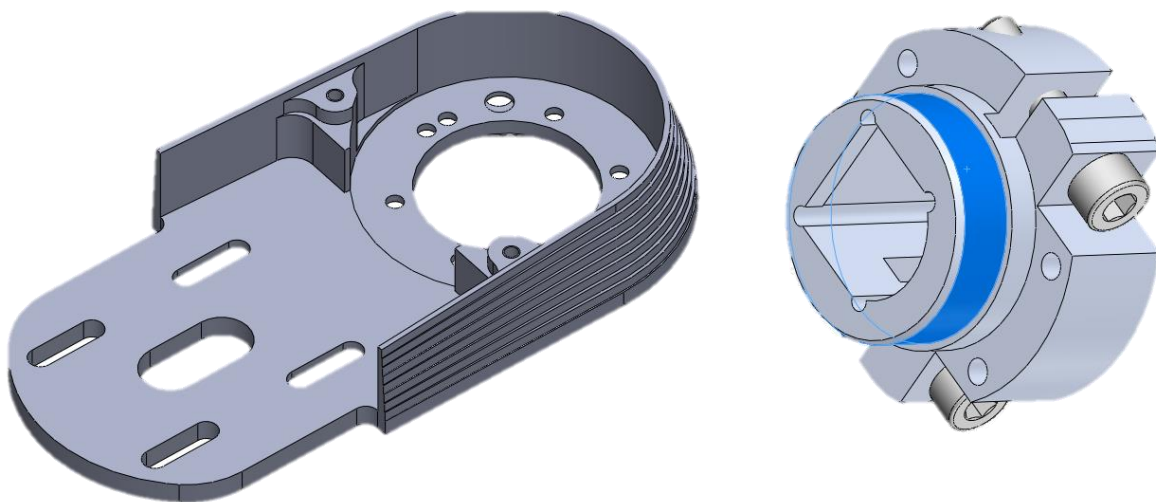
$$\frac{F_{p1}}{2} = c \cdot s_1 \quad (28)$$

$$s_1 = L_0 - L_1 \quad (29)$$

$$L_1 = \frac{c \cdot L_0 - \frac{F_{p1}}{2}}{c} = \frac{11,18 \cdot 28 - \frac{230,65}{2}}{11,18} = 17,68 \text{ mm} \quad (30)$$

Následující návrh držáku byl zaměřen na minimální rozměry a co nejjednodušší výrobitelnost. S pomocí FDM tiskárny vzniklo mnoho prototypů, kde se zkoušela smontovatelnost a uložení s ostatními součástmi. Zde bylo možné se více zabývat pevnostními výpočty, tepelnými a modálními analýzami ale tyto analýzy nejsou součástí zadání této diplomové práce, držák je tak záměrně předimenzovaný, i svojí geometrií i použitým materiálem.

Další důležitou součástí je unašeč. Jeho funkcí je spojit hanger s držákem motoru a dále vytvořit plochu pro uložení ložiska k velké řemenici. Většina výrobců tento díl nevyužívá a místo něj ho rovnou vytvoří v rámci hangeru. Díky použití standardních trucků ale bylo nutné tento díl použít. Na Obr. 62 lze vidět návrh unašeče, modře je zde označena plocha pro uložení ložiska 6308. Za ní je po celé délce těla drážka, která dovoluje dvěma šroubům vytvořit svěrný spoj a zajistit tak unašeč axiálně. Radiálně je jištěn tvarem otvoru, který kopíruje trucky Caliber II. I zde byl brán ohled zejména na co nejjednodušší výrobitelnost. I tak se ale tento díl ukázal jako nejvíce komplikovaný, a to zejména z hlediska uložení.



Obr. 62 – Návrh držáku (nalevo) a unašeče (napravo)

6.4.1 VÝROBA OBRÁBĚNÝCH DÍLŮ

S výrobou držáků nebyl žádný větší problém, od začátku byl zamýšlen pro obrábění na CNC frézce a podařilo se obejít bez kulové frézy. Toho si lze povšimnout na Obr. 63, že vnější obrys je odstupňován a nejde o souvisle se měnící plochu. Tím se jednak dalo obrábět pouze klasickou stopkovou frézou a zároveň to i zvýšilo obsah této plochy o 24,6 %, což má pozitivní vliv na odvod tepla z elektromotoru. Jediným malým zadrhelem, na který se přišlo až u výroby byla nerovnoběžnost ploch podél osy symetrie. Okem nerozeznatelných $0,8^\circ$ zezáčátku způsobovalo nedokonalé upnutí ve svěráku, ale to bylo snadno opraveno. Obr. 63 lze vidět napravo konečný prototyp vytištěný na FDM tiskárně, nalevo pak již funkční výrobek z hliníkové slitiny. Jde o jednu z nejpevnějších slitin duralu 7075-T6, která disponuje pevností jako běžná ocel, stále ale přitom s hustotou hliníku.



Obr. 63 – Nalevo prototyp držáku vytištěný FDM tiskárnou, nalevo funkční výrobek vyrobený CNC frézováním.

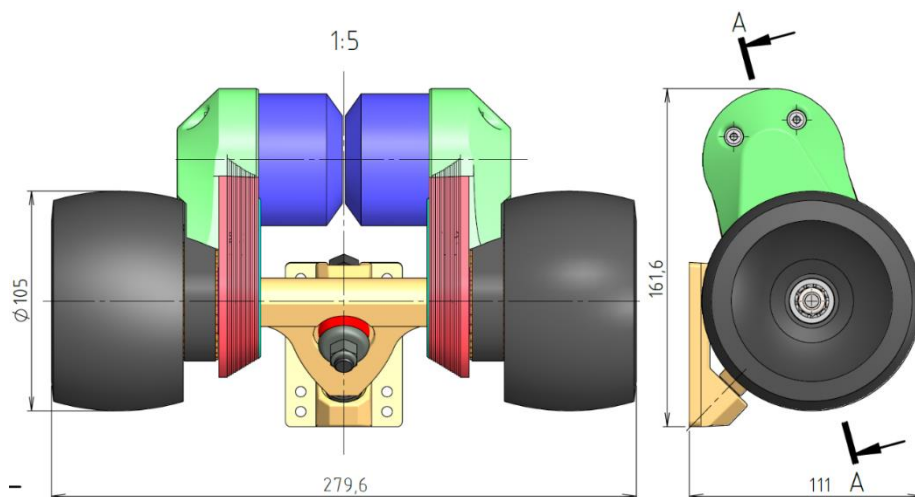
Problém nastal s vyladěním geometrie unašeče a to už ve fázi prototypování. Ukázalo se totiž že trucky Caliber II, který mají hanger pro lepší mechanické vlastnosti vyráběný kovářím, jsou velmi nepřesné. Na Obr. 64 lze vidět měření obvodového házení pomocí číselníkového úchylkoměru.



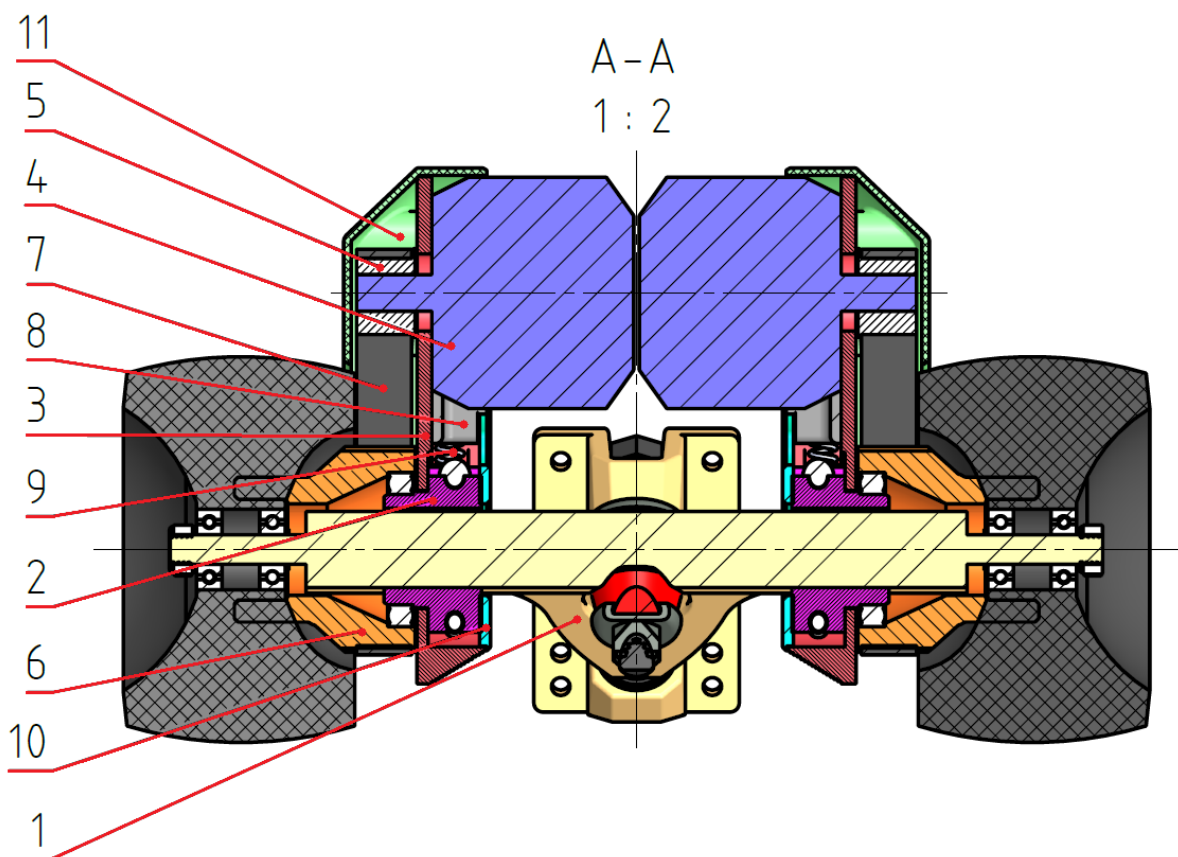
Obr. 64 – Měření obvodového házení unašeče s nasazeným ložiskem

6.5 SESTAVA HNACÍHO ÚSTROJÍ

Celková sestava hnacího ústrojí je na Obr. 65. Kromě hlavních součástí, které zde již byly popsány jako je motor a jeho držák s unašečem, řemen, řemenice a pastorek lze na Obr. 66 vidět doplňující díly, jde o kryty. Jeden je určen pro kryt pastorku s řemenem (pozice 11), druhý kryje tlačné pružiny (pozice 10). Rozměry jsou znázorněny na obr. 66, hmotnost činí 2982 g.



Obr. 65 – Základní pohledy a rozměry navrženého hnacího ústrojí.



Obr. 66 – Řez sestavou hnacího ústrojí; 1 – Caliber II truck, 2 -unašeč, 3 -držák motoru, 4 - elektromotor 6355 160KV, 5 -pastorek $z_p=15$, 6 – řemenice $z_{2s}=36$, 7 – ozubený řemen HTD 5M 265 mm, 8 – doraz pružin, 9 – šroubová pružina D5520, 10 – kryt držáku, 11 kryt řemenu.

7 MODEL PODÉLNÉ DYNAMIKY

Pro další optimalizaci hnacího ústrojí je třeba vytvořit model podélné dynamiky jízdy. Tato kapitola bude zaměřena zejména na zrychlení. Bude proveden výpočet v programu Matlab, který bude dále srovnán s reálnými daty.

7.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET ZRYCHLENÍ

Při zrychlování musí vozidlo překonávat 4 druhy odporů, jedná se o odpor valivý, aerodynamický, stoupání a zrychlení [58]. Jejich součtem je celková hnací síla, kterou musí vozidlo působit v opačném směru při daném zrychlení (rovnice 31). V tomto případě je hnací síla známa díky naměřeným momentovým charakteristikám a neznámé je dané zrychlení, které se vyskytuje v odporu zrychlení.

$$F_{\text{hnací}} = O_{\text{valivý}} + O_{\text{aerodynamický}} + O_{\text{stoupání}} + O_{\text{zrychlení}} \quad (31)$$

7.1.1 ODPOR VALIVÝ

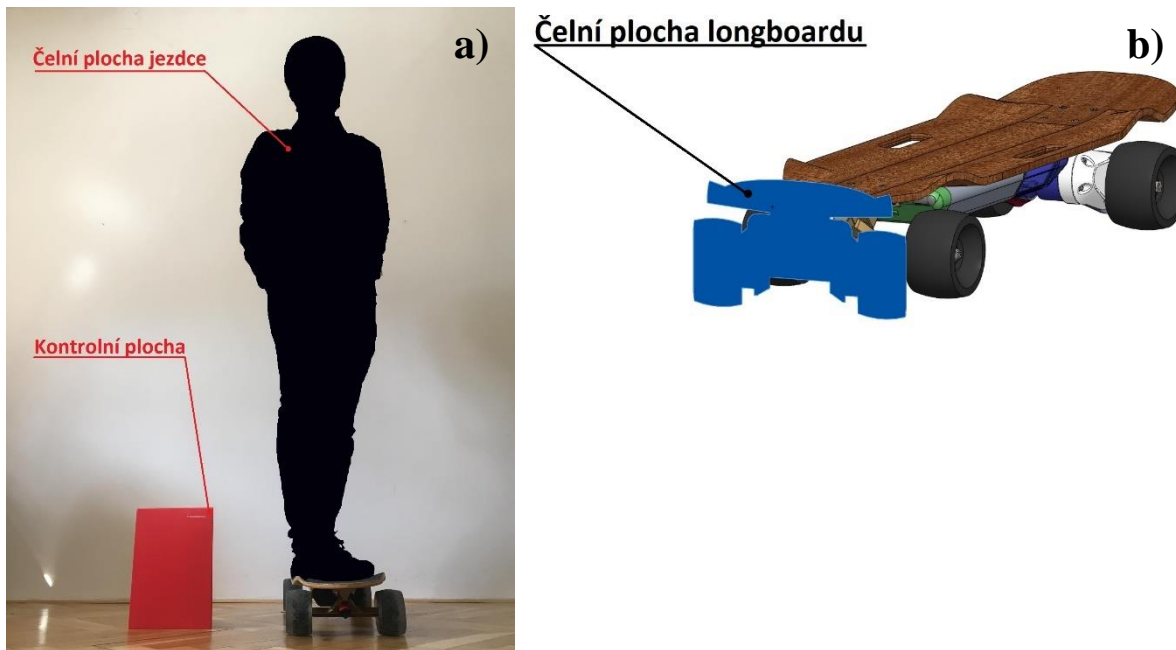
Tento odpor vzniká díky deformaci kola při valení po vozovce (vozovka je uvažována jako dokonale tuhá). Velký vliv na tento odpor mají dva faktory, prvním je kvalita povrchu vozovky a druhým tvrdost kol. Je zde zaveden koeficient valivého odporu f , který závisí kromě materiálových vlastností i na průměru kol, jejich zatížení apod [58]. Tento koeficient nabývá hodnot od 0,04 do 0,08 [59]. V rovnici (32) je uveden vztah pro výpočet síly pro překonání valivého odporu. Hodnota 4 ve jmenovateli je kvůli rozložení na všechna 4 kola.

$$O_{\text{valivý}} = \frac{m g}{4} f \quad (32)$$

7.1.2 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Jde o jeden z nejvýznamnějších odporů, který navíc závisí na rychlosti a roste s její druhou mocninou. Zjednodušeně řečeno jde o odpor proti pohybu v daném prostředí. V případě elektrického longboardu není mnoho možností, jak jeho účinky zmenšit, největší podíl totiž tvoří čelní plocha samotného jezdce, elektrický longboard má tuto plochu řádově menší. Síla aerodynamického odporu se vypočítá podle rovnice (33). Hustota vzduchu ρ je známá hodnota, rychlost v je určena návrhem hnacího ústrojí ale součinitel aerodynamického odporu C_d se volí experimentálně. Toto měření ale není součástí diplomové práce, proto byla zvolena nejhorší možná hodnota a to 0,7. Pro srovnání, osobní automobily nabývají hodnot 0,3-0,4 a hodnota 0,7 odpovídá hodnotám autobusů. Dále se v rovnici (33) vyskytuje čelní plocha, která byla zjednodušeně změřena pomocí známé plochy na fotografii.

$$O_{\text{aerodynamický}} = \frac{1}{2} C_d S_x \rho v^2 \quad (33)$$



Obr. 67 a) Fotografie pro určení čelní plochy jezdce,
b) Čelní plocha longboardu odečtena z CAD modelu

Na Obr. 67 lze vidět vyznačené plochy, černě je zde neznámá čelní plocha jezdce. Ve stejné vzdálenosti od objektivu je umístěn červený papír ve formátu A4, jeho rozměry jsou tedy známé. Vydělením počtu pixelů jezdce počtem pixelů papíru A4 byl získán poměr, který byl dále vynásoben skutečnou plochou A4 a tím je získána plocha jezdce $0,325 \text{ m}^2$. Sečtením s čelní plochu longboardu (Obr. 67) byla získána celková čelní plocha činící $0,358 \text{ m}^2$. Tento postup je zjednodušený a nezaručuje přesný výsledek vlivem perspektivy a promítání obrazu pouze do jednoho bodu.

7.1.3 ODPOR STOUPÁNÍ

Tento odpor vzniká při pohybu po nakloněné rovině vlivem rozkladu tíhové síly do normálového směru k vozovce a do směru rovnoběžného s vozovkou, který jde proti hnací síle. Čím větší je tedy úhel nakloněné roviny β , tím větší je odporová síla stoupání $O_{stoupání}$. Výpočet se provádí podle rovnice (34).

$$O_{stoupání} = m g \sin (\beta) \quad (34)$$

7.1.4 ODPOR ZRYCHLENÍ

Jde o odpor setrvačných sil působících proti zrychlení, při ustálené rychlosti je nulový. Skládá se ze dvou složek, z odporu posuvných částí $O_{posuvné}$ a odporu rotačních částí $O_{rotační}$ (rovnice (35). Odpor posuvných částí lze snadno spočítat pomocí Newtonova druhého pohybového zákona)

(36). Pro odpor rotačních částí je nutné vyčíslit redukovaný moment setrvačnosti celé poháněné sestavy M_{red} a dále i otáčejících se předních kol $M_{přední_kola}$, která poháněna nejsou (37).

$$O_{zrychlení} = O_{posuvné} + O_{rotační} \quad (36)$$

$$O_{posuvné} = m a \quad (37)$$

$$O_{rotační} = \frac{M_{red} + M_{přední_kola}}{\frac{D_k}{2}} = 2 \frac{I_{red} \alpha \eta + I_4 \alpha}{\frac{D_k}{2}}$$

Při výpočtu redukovaného momentu jsou využívány hodnoty momentů setrvačnosti jednotlivých součástí, které jsou všechny odečteny z CAD programu Solidworks (38). Jde o motor, pastorek, velkou řemenici a kolo (Obr. 68). Ozubený řemen je v tomto výpočtu zanedbán.

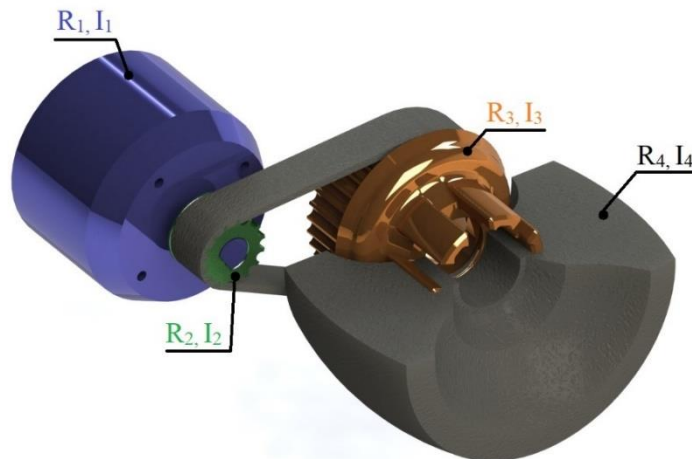
$$\frac{1}{2} I_{red} \omega_4^2 = \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 + \frac{1}{2} I_3 \omega_3^2 + \frac{1}{2} I_4 \omega_4^2 \quad (38)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \quad (39)$$

$$\omega_3 = \omega_4 \quad (40)$$

$$\omega_1 = \omega_4 \frac{R_3}{R_2} \quad (41)$$

$$I_{red} = \left(\frac{R_3}{R_2} \right)^2 (I_1 + I_2) + I_3 + I_4 \quad (42)$$



Obr. 68 Součástí pohonu, které je třeba zohlednit ve výpočtu odporu rotačních součástí (zde pouze jedna polovina)

Vztahy)

(39) a)

(40) popisují skutečnost, že motor s pastorkem mají stejnou úhlovou rychlost a stejně tak řemenice s kolem. Vztah)

(41) určuje poměr mezi těmito rychlostmi. Po úpravách byla získána rovnice)

(42), která nahrazuje momenty setrvačnosti jediným redukovaným momentem, se kterým bude dále počítáno. Spojením vztahu pro souvislost mezi úhlovým a podélným zrychlením (43) vzniká finální vztah pro sílu odporu zrychlení (44).

$$\alpha = \frac{a}{\frac{D_k}{2}} \quad (43)$$

$$O_{zrychlení} = ma + 2 \frac{I_{red} a \eta + I_4 a}{\left(\frac{D_k}{2}\right)^2} \quad (44)$$

7.1.5 CELKOVÝ JÍZDNÍ ODPOR

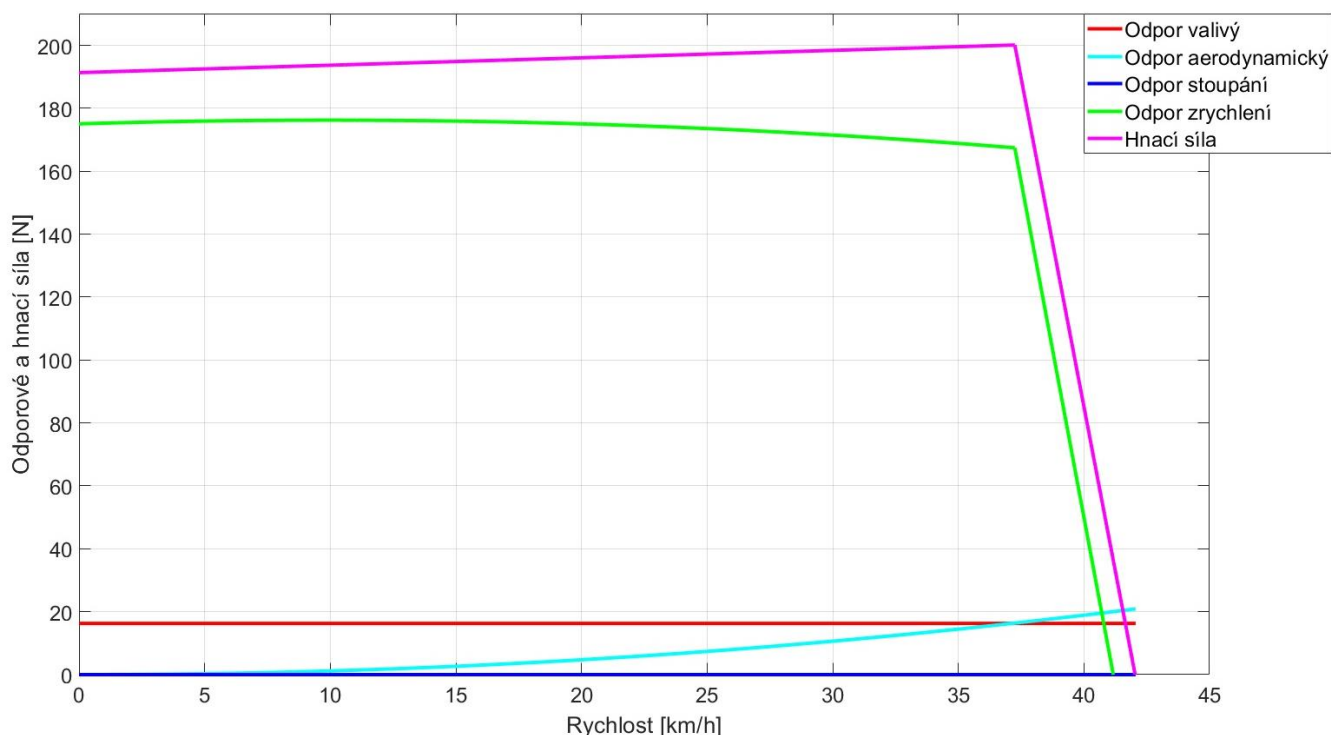
Součet všech jízdních odporů je roven celkové hnací síle, která je nutná pro jejich překonání (45). Jak již bylo řečeno, neznámou ale není hnací síla nýbrž celkové zrychlení, které dokáže hnací ústrojí vyvinout. Po dosazení rovnice (43) vzniká finální tvar zrychlení, které obsahuje všechny druhy odporů (46).

$$F_{hnací} = mgf + \frac{1}{2} C_d S_x \rho v^2 + m g \sin(\beta) + 2 \left(m a + \frac{I_{red} a \eta + I_4 a}{\left(\frac{D_k}{2}\right)^2} \right) \quad (45)$$

$$a = \frac{F_{hnací} - mgf - \frac{1}{2} C_d S_x \rho v^2 - m g \sin(\beta)}{2 \left(m + \frac{I_{red} \eta + I_4}{\left(\frac{D_k}{2}\right)^2} \right)} \quad (46)$$

Na Obr. 69 jsou vyneseny jednotlivé odpory. Je zde uvažována jízda po rovině, a tedy nulový úhel β a odpor stoupání. Odpor valení je uvažován jako konstantní, nezávislý na rychlosti.

Aerodynamický odpor roste s druhou mocninou rychlosti, ale jeho hodnota není příliš velká díky relativně malým dosahovaným rychlostem. Největším odporem je zde odpor zrychlení, který po celou dobu téměř kopíruje křivku hnací síly. Maximální rychlost, tedy bod, kdy je zrychlení nulové činí 41,346 km/h. Všechny síly jsou spočítány v programu Matlab a jsou součástí přílohy jako livescript (Příloha_1_191806).

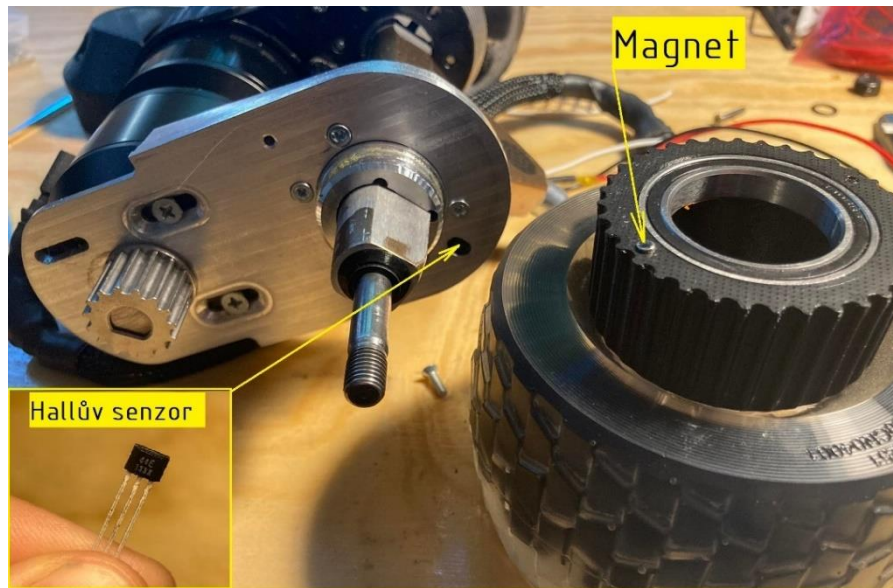


Obr. 69 Závislost jednotlivých odporů a hnací síly na rychlosti

7.2 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ

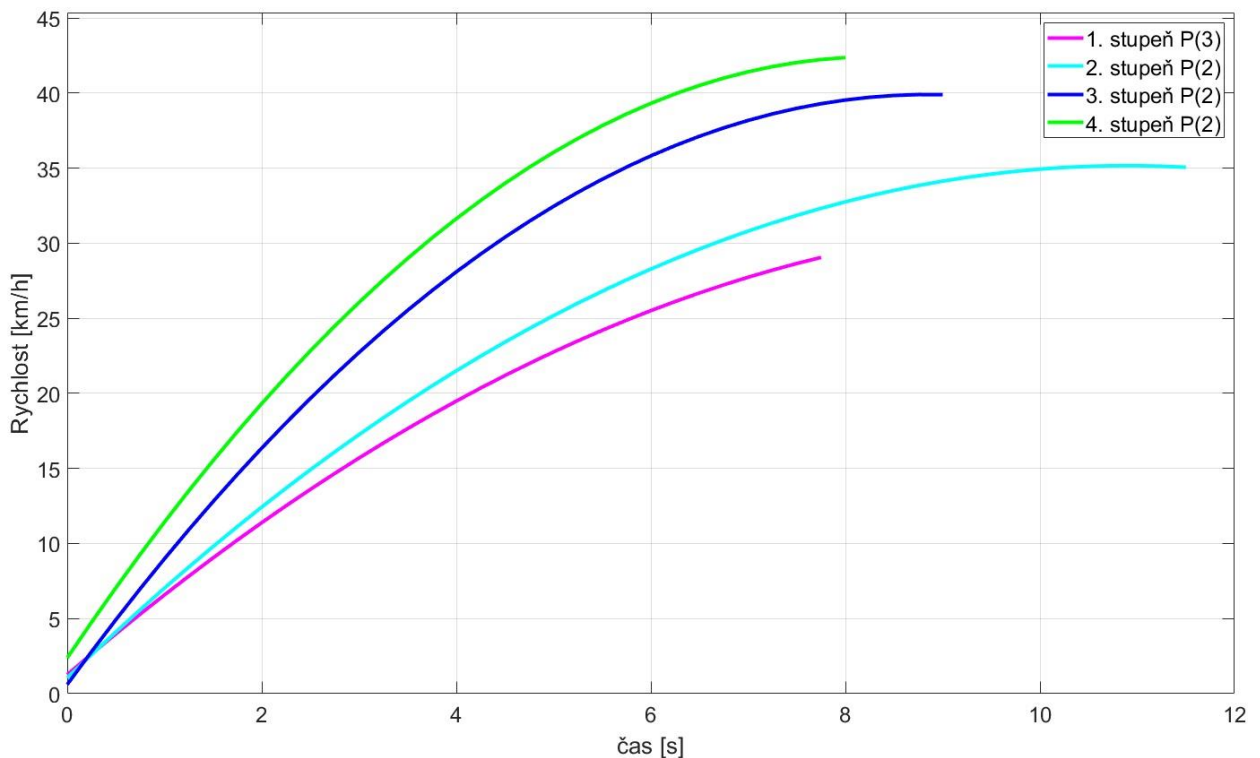
Měření zrychlení proběhlo nepřímo pomocí měření otáček kol. Toho bylo dosaženo pomocí instalace Hallova senzoru do držáku motoru a magnetu do řemenice. Byl použit senzor 44E A1344EUA-T, který nezjišťuje velikost magnetického pole, ale pouze jeho přítomnost. Při magnetickém toku nižším než 50 G vysílá na výstupu logickou nulu, při překročení 350 G logickou jedničku. Pokud je tedy na řemenici namontován dostatečně blízko magnet, při každé otáčce ho senzor zaznamená a vyšle pulz. Datalogger měří frekvenci těchto pulzů a ukládá ji opět na paměťovou kartu. Tentokrát nebyla využita aplikace Blynk kvůli ušetření výpočetního výkonu. Na Obr. 70 lze vidět konkrétní umístění senzoru i magnetu. Magnet byl použit neodymový o průměru 3 mm a délce 4 mm. Měření zrychlení probíhalo z klidového stavu, poté byl ovladačem nastaven plný plyn a měření bylo ukončeno po dosažení maximální rychlosti.

Zároveň byly vyzkoušeny i všechny přednastavené módy zrychlení a max. rychlosti. Výrobce umožňuje nastavení od 1. stupně, který je pro úplné začátečníky a má velmi pozvolné zrychlení a dovoluje i relativně malou max. rychlost. 2. stupeň je pro pokročilejší jezdce a zároveň je určen jako nejúspornější, nenabízí max. zrychlení ani nedovoluje jízdu max. rychlostí ale obě mezní hodnoty jsou větší než u módu 1. 3. stupeň je asi nejvíce využívaný, protože představuje rovnováhu mezi výkonem a spotřebou energie. Již dovoluje jízdu na téměř max. rychlost, zrychlení je ale stále lehce regulátorem omezováno. Ve 4. stupni je obecně povolena max. rychlost i zrychlení, které regulátor a potažmo celý systém akumulátor – regulátor – elektromotor dokáže generovat. Tento stupeň je zároveň nejméně energeticky úsporný.



Obr. 70 Umístění senzoru pro měření otáček za jízdy

Po přepočítání otáček na rychlost pomocí vztahu (18) a proložení polynomy pomocí funkcí *polyfit* a *polyval* byly vyneseny závislosti jednotlivých rychlostí na čase (Obr. 71). Měření bylo zatíženo chybou, kdy začátek měření neprobíhal přímo z klidové polohy ale s malou počáteční rychlostí, u posledního stupně až 3 km/h. Bylo to způsobeno nedokonalým rozjezdem, jelikož nebyly zapojeny Hallovy sondy, které by regulátoru poskytovali informaci o aktuální pozici rotoru.



Obr. 71 Závislost rychlosti jednotlivých módů nastavení na čase

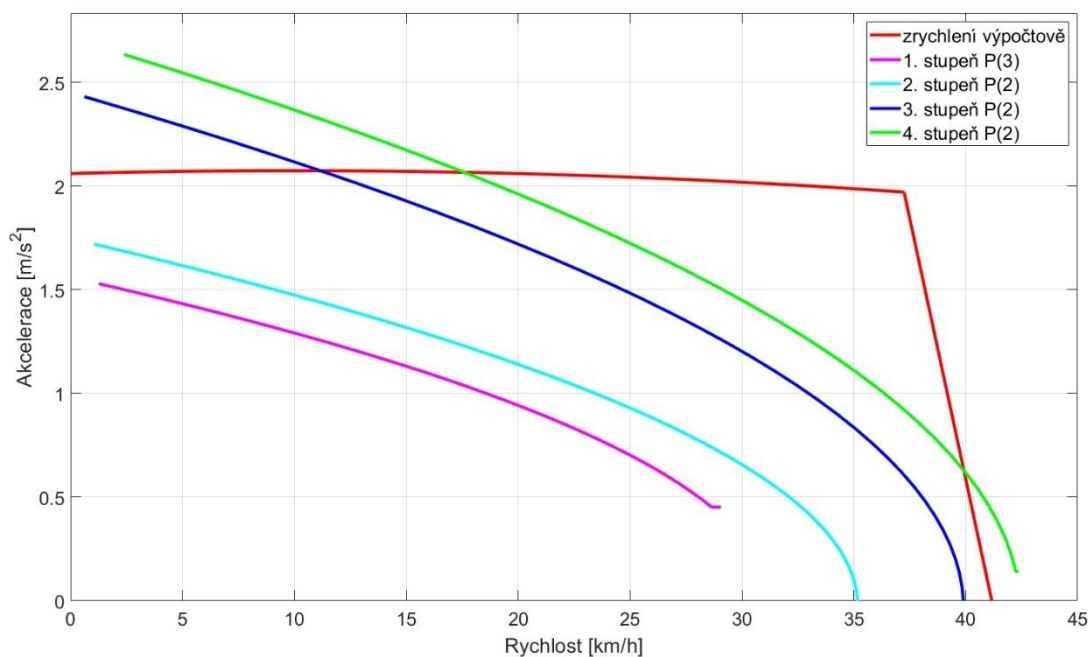
7.3 DISKUSE

Po vypočítaných rychlostech bylo možné provést výpočet zrychlení podle rovnice (44). V programu Matlab toho bylo docíleno pomocí funkcí *diff*. Na Obr. 72 lze vidět průběhy zrychlení u jednotlivých stupňů nastavení a dále je zde vykresleno zrychlení spočítané podle rovnice (47).

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{47}$$

Maximální změřená rychlost při posledním stupni činí 42,24 km/h, je tedy o 1,09 km/h větší než odečtená z výpočtového zrychlení. Při návrhu byla v rovnici (18) max. rychlost stanovena 37,3 km/h. Důvody, proč je naměřená hodnota vyšší jsou dva. Prvním je, že měření probíhalo při plně nabitém akumulátoru, kdy má vyšší napětí než nominálních 36 V. Vyšší napětí posouvá maximální rozsah otáček a tím i rychlost. Druhým důvodem je navrhování hnacího ústrojí s výkonovými rezervami, které představuje uvažování maximálních provozních otáček ty s max. naměřeným momentem, než začne moment prudce klesat. Z Obr. 69 ale vyplývá že při ustálené rychlosti, kdy by odpor zrychlení byl nulový, by bylo možné dosáhnout rychlost přes 40 km/h. Ve výpočtu zrychlení byla upravena hodnota valivého odporu f na 0,04 a součinitel aerodynamického odporu C_d na 0,4. Při těchto parametrech se naměřená rychlost liší pouze o 0,7 km/h ale pro jejich přesné určení by bylo nutné další měření, např. dojezdová zkouška.

Dále byl zkoumán tvar křivek naměřených zrychlení s tvarem vypočítaného zrychlení. U prvních stupňů bylo předpokládáno omezení zrychlení pod maximální vypočítanou hodnotu. Pro první dva stupně je tato úvaha správná. Třetí i čtvrtý stupeň však hodnotu maximálního vypočítaného zrychlení v rozsahu rychlostí 0 až přibližně 17 km/h překonává a dále klesá pod vypočítané max. zrychlení. Tento jev lze vysvětlit opět dvěma důvody. Prvním je nepřímé měření, kdy je zrychlení dopočítáno a je zatíženo numerickou chybou, přesnější by bylo použití akcelerometru.



Obr. 72 Srovnání naměřených a vypočítaného zrychlení

Druhý důvod spočívá ve výpočtu akcelerace. Ten vychází z momentové charakteristiky motoru, která však byla měřena na standu s jiným regulátorem, než který je použit v elektrickém longboardu. Stávající je s motory plně kompatibilní, sériově je dodáván s motory stejné velikosti i počtem otáček na 1 V. V základním nastavení umožňuje vybrání HUB nebo BELT pohonu, v případě BELT pohonu i převodový poměr a průměr použitých kol. Žádné další nastavení ale možná nejsou. Pro účely této práce by tedy bylo vhodnější vybrat jiný regulátor s více nastaveními, např. VESC nebo alespoň měřit některé další veličiny za jízdy, např. výkon.

Celé měření probíhalo s 2. variantou řemenic, tedy $z_{2s} = 36, i_{2s} = 2,4$ (Obr. 73). Maximální rychlost byla požadována přibližně stejná jako koncepčně nejbližší model Exway Wave, tedy 40 km/h. Tuto rychlost je hnací ústrojí schopné vyvinout i mírně překročit a vzhledem k délce desky a rozvoru kol byla varianta 1, s kterou by bylo možné dosáhnout ještě vyšších rychlostí, vyloučena.

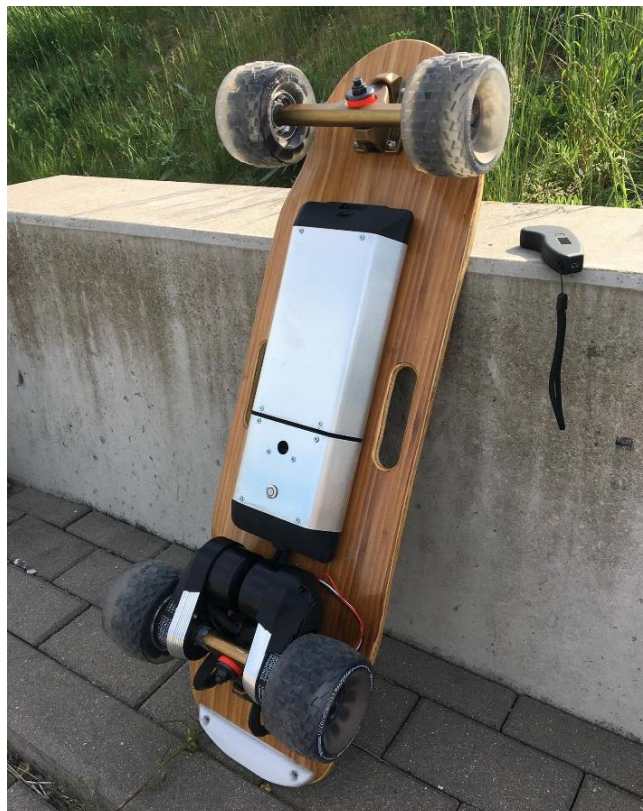
ZÁVĚR

Úvodní část této práce je věnována rešerši elektricky poháněných longboardů se zaměřením na použité pohonné ústrojí. Výstupem rešeršní části bylo zvolení koncepce pohonného ústrojí. Na základě způsobu použití jako dopravního prostředku pro každodenní dojíždění a předpokládané lokalitě mírně kopcovitého městského prostředí s neúplnou sítí cyklostezek, byl zvolen pohon pomocí ozubeného řemene (BELT).

Další část je věnována návrhu celé sestavy, počínaje deskou, přes kryty akumulátoru a regulátoru až po samotné hnací ústrojí. Po zvolení konfigurace akumulátoru 10 článků v sérii a 2 paralelně, byl vybrán regulátor a další kapitoly byly věnovány výběru nejvhodnějšího elektromotoru.

Na základě dostupnosti a zástavbových rozměrech byly vybrány 3 elektromotory, které byly podrobeny měření na brzdícím standu pro zjištění jejich charakteristik. Měření se skládalo ze dvou částí. V první části byly naměřeny momentová a výkonová charakteristika při maximálních parametrech povolených výrobcí motorů. Ve druhé části byl měřen vývoj teploty na rotoru a statoru při konstantním zatížení momentem 1 Nm při otáčkách 2500 min^{-1} a po dobu 3 min. Před samotným měřením byl navrhnout a vyroben vlastní datalogger, který sloužil pro zaznamenání těchto teplot. Výstupem měření byla volba optimálního elektromotoru s označením 6355 160KV, který vykazoval největší moment, v daném spektru téměř konstantní a zároveň s nejmenším přírůstkem teplot.

Po výběru elektromotoru byl dokončen návrh hnacího ústrojí, zvolen převodový poměr, $i_{2s} = 2,4$ a všechny navrhnuté součásti včetně akumulátoru a jeho krytu a držáků motorů byly vyrobeny.



Obr. 73 – Finální sestava

Poslední část je věnována měření akcelerace a tvorbě parametrického modelu podélné dynamiky. Pro měření otáček jednoho zadního kola za jízdy byl opět použit navržený datalogger, který pomocí Hallova senzoru snímal frekvenci otáčení. Tím byla zjištěna rychlost elektrického longboardu s jezdce, která byla poté převedena v programu Matlab na zrychlení. Měření byly zároveň zjištěny akcelerační křivky čtyř různých jízdních módů přednastavených výrobcem regulátoru. Porovnáním naměřených hodnot zrychlení s hodnotami vypočítanými byla zjištěna odchylka. Ta je způsobena jednak samotným měřením akcelerace nepřímo a dále použitím jiného regulátoru, než s kterým byly elektromotory bržděny, navíc bez možnosti hlubších nastavení.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Historpedia - *From Skateboard and Longboard to Penny Board (Fall 2102)*. [online]. [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/umn.edu/historpedia/home/arts-new-ideas/from-skateboard-and-longboard-to-penny-board-fall-2102>
- [2] Historie Freebordingu | Všechno ze světa prken | Boardcruisers.cz. Poradíme jaké vybrat prkno | *Boardcruisers.cz* [online]. [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://boardcruisers.cz/freebord/historie-freebordingu/>
- [3] Skateboard or longboard : which should you choose for your next board ?. *Riding Boards* [online]. [cit. 27.04.2022]. Dostupné z: <https://www.ridingboards.com/skateboard-or-longboard/>
- [4] Cruiser and Carver Longboard Buyer's Guide | DB Longboards. Dedicated to Longboarding | *DB Longboards* [online]. Copyright ©2016 DB [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://dblongboards.com/cruiser-carver-longboard-buyers-guide>
- [5] Návod: Jak vybrat longboard / cruiser. Honzovy longboardy - Skateshop | *longboardy, skateboardy, trekové brusle, penny boardy, freestyle koloběžky* [online]. [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.honzovy-longboardy.cz/jak-vybrat/jak-vybrat-longboard/>
- [6] *Shopify Imagery* [online]. Copyright ©A [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0024/4321/4895/files/Poster_for_Braille622018_1-1_700x-Recovered_700x.png?v=1541196244
- [7] *Throttled (429)*. *Throttled (429)* [online]. [cit. 20.05.2022] Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/avenuetrucks/avenue-suspension-skateboard-trucks>
- [8] ABEC 11 Abec11 Flywheels Longboard Wheel Set (4 Pieces) 97 mm 75 a : Amazon.co.uk: Sports & Outdoors. *Amazon.co.uk: Low Prices in Electronics, Books, Sports Equipment & more* [online]. Copyright © 1996 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/Abec11-Flywheels-Longboard-Wheel-Set-Pieces/dp/B073YB4B2X>
- [9] Amazon.com. *Amazon.com* [online]. Copyright © 1996 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: https://www.amazon.com/IWONDER-Discovery-Skateboard-Translucent-Longboard/dp/B08865T39Y/ref=pd_sbs_sccl_3_2/138-9413926-9754711?pd_rd_w=0Kbnf&pf_rd_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf_rd_r=2ETVEP9ZTGZRK8NP0C39&pd_rd_r=a96b02d3-642d-443b-8400-9ea0a6432538&pd_rd_wg=RbDoA&pd_rd_i=B08865T39Y&th=1
- [10] The Motorized Skateboard Renaissance. *Forbes* [online]. Copyright © 2022 Forbes Media LLC. All Rights Reserved [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/timconneally/2014/09/02/the-motorized-skateboard-renaissance/>
- [11] PayPal. *Teamgeeboards* [online]. Copyright © 2022 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.teamgeeboards.com/blogs/blog/do-you-know-whats-the-first-electric-skateboard-looks-like>
- [12] Kickstarters Projects *Boosted* [online]. [cit. 27.04.2022] Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/170315130/boosted-boards-the-worlds-lightest-electric-vehicl>
- [13] Boosted Blog. *Boosted Blog* [online]. [cit. 25.04.2022] Dostupné z: <https://boostedboards.posthaven.com/>

- [14] Boosted Boards Gen 3 Launch - Design Case Study. *Kyson Dana - Design & Art Direction* [online]. [cit. 25.04.2022] Dostupné z: <https://www.kysondana.com/case-studies/boosted-product-launch>
- [15] Boosted Board Stealth | Voltes - *Voltes*. [online]. [cit. 25.04.2022] Copyright © Copyright 2022 Voltes [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.voltes.nl/en/boosted-board-stealth.html>
- [16] Boosted Boards by Ueno. A case study.. Ueno. *A full-service creative agency*. [online]. Dostupné z: <https://ueno.co/work/boosted-boards/>
- [17] Amazon.com *Amazon.com* [online]. [cit. 25.04.2022] Dostupné z: <https://www.amazon.com/stores/Inboard/Inboard/page/08BD4583-47FA-47A3-875C-CF3AF04DF434>
- [18] Inboard M1 Electric Skateboard | The Coolector. The Coolector | Men's Lifestyle Magazine | *Design, Gear & Fashion* [online]. Copyright © The Coolector 2021. All images are copyrighted by the respective authors. [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.thecoolector.com/inboard-m1-electric-skateboard/>
- [19] Inboard M1 Electric Longboard Review | Electric Boards Advisor. Best e-skate & e-longboards Reviews & Guides | *Electric Boards Advisor* [online]. Copyright © 2022 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://eboardsadvisor.com/inboard-m1-electric-longboard-review/>
- [20] Evolve Pintail Components (Can Fit 50 cells) + 4.12 VESC - Used Parts for Sale - esk8.news forums. esk8.news forums - *esk8.news* [online]. Dostupné z: <https://forum.esk8.news/t/evolve-pintail-components-can-fit-50-cells-4-12-vesc/9242>
- [21] Scooter Hut | Evolve HADEAN BAMBOO ALL-TERRAIN Electric Skateboard. Scooter Hut | *The World's Most Trusted Scooter Store* [online]. Copyright © 2022 Scooter Hut [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://scooterhut.com.au/evolve-hadean-bamboo-all-terrain-electric-skateboard/>
- [22] *Shopify Imagery* [online]. Copyright © [cit. 01.05.2022]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0232/5683/products/Lifestyle_Carbon_ST_2_b29ea11f-2a5c-4c1c-a587-f99db6d25342_2048x2048.jpg?v=1611422581
- [23] Scooter Hut | Evolve HADEAN CARBON ALL-TERRAIN Electric Skateboard. Scooter Hut | *The World's Most Trusted Scooter Store* [online]. Copyright © 2022 Scooter Hut [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://scooterhut.com.au/evolve-hadean-carbon-all-terrain-electric-skateboard/>
- [24] Buy Mellow Board Cruiser . *The Electric Skateboard Drive that fits under any Skateboard* [online]. Copyright © 2020 Mellow Boards GmbH. [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.mellowboards.com/en/Products/Mellow-Board-Cruiser.html>
- [25] Exway Electric Skateboard. Exwayboard - *The Most Advanced, Smartest Electric Skateboard* [online]. Copyright © [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.exwayboard.com/pages/about-us>



- [26] Exway - X1 Flex Riot 37" - elektrický longboard - Honzovy Longboardy. Honzovy longboardy - Skateshop | *longboardy, skateboardy, trekové brusle, penny boardy, freestyle koloběžky* [online]. Dostupné z: <https://www.honzovy-longboardy.cz/exway-x1-flex-riot-37-elektricky-longboard/>
- [27] Exway X1 Pro electric skateboard review: A fast, fun and powerful esk8! - Electrek. Electrek - *EV and Tesla News, Green Energy, Ebikes, and more* [online]. Dostupné z: <https://electrek.co/2019/09/09/exway-x1-pro-electric-skateboard-review/>
- [28] Elektrický offroad longboard Exway Atlas - *Speedio.cz.* [online]. Copyright © 2015 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://speedio.cz/elektricky-offroad-longboard-exway-atlas>
- [29] JETSURF® Motorized Surfboard. *Object moved* [online]. Copyright © [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.jetsurf.com/cz/skateboards/electric-powered/skateboard-race>
- [30] About Backfireboards *Backfireboards* [online]. Copyright © [cit. 19.05.2022] <https://www.backfireboards.com/pages/about>
- [31] All Boards *Meepo* [online]. Copyright © [cit. 10.05.2022] <https://www.meepo.com/collections/electric-skateboards>
- [32] Wawgo *Boards* [online] [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://wowgo.com/collections/electric-skateboards>
- [33] Onsra Story *Onsra* [online] [cit. 11.03.2022]. Dostupné z: <https://onsra.com.au/pages/the-onsra-story>
- [34] Slick Revolution Flex-E 2.0 Carbon Electric Skateboard - Free Delivery. Electric Bike, Scooter & Skateboard Specialists | *Ride + Glide* [online]. Copyright © 2022 Ride [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.rideandglide.co.uk/product/slick-revolution-flex-e-2-0-carbon-electric-skateboard/>
- [35] Slick Revolution 120mm Foamies - E-RIDERZ. E-RIDERZ AUSTRALIA | *Electric Unicycle Specialists - E-RIDERZ* [online]. Copyright © Copyright E [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://e-riderz.com.au/product/slick-revolution-120mm-foamies/>
- [36] Lacroix Lonestar Supersport™ - Voltaic Motion. *Voltaic Motion - Personal Transport & Recreational Electric Vehicles* [online]. Dostupné z: <https://voltaic-motion.com/product/lacroix-lonestar-supersport/>
- [37] Bioboards Eskate *Biobords* [online] Copyright © Copyright [cit. 20.05.2022] <https://www.bioboards.se/pages/about>
- [38] About The G4 Range *Bajaboard* [online] [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.bajaboard.com.au/pages/about-g4>

- [39] Jaká je účinnost řemenových převodů? | TYMA CZ. TYMA CZ | *Klínové, ozubené řemeny a řemenice, řetězy, spojky* [online]. Copyright © 2004 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/technicke-informace/caste-dotazy/ucinnost-remenu/>
- [40] Hoyt ST Review – Eskate Made in the USA – E-Skateboarder. E-Skateboarder – electric skateboards | *Reviews, Tips and Guides* [online]. Copyright © 2022 e [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://e-skateboarder.com/hoyt-st/>
- [41] Exway - X1 MAX 37" - HUB - elektrický longboard - Honzovy Longboardy. Honzovy longboardy - *Skateshop | longboardy, skateboardy, trekové brusle, penny boardy, freestyle koloběžky* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.honzovy-longboardy.cz/exway-x1-max-37-hub-elektricky-longboard/>
- [42] Electric Skateboard Onsra Challenger-Direct Drive + 105mm - 43693. [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.sports-discount.net/en/onsra/-43693-electric-skateboard-onsra-challenger-direct-drive-105mm.html>
- [43] Exway - Wave Riot - elektrický skateboard - Honzovy Longboardy. Honzovy longboardy - *Skateshop | longboardy, skateboardy, trekové brusle, penny boardy, freestyle koloběžky* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: https://www.honzovy-longboardy.cz/exway-wave-riot-elektricky-skateboard/?gclid=Cj0KCQjw-JyUBhCuARIsANUqQ_KUMKtu-SzGbeK5v0opYvwswyg1e_FDx6w4yQKoqUTLAvhU-XLcoUAaAisOEALw_wcB
- [44] Battery Comparison of Energy Density - Cylindrical and Prismatic Cells. Manufacturing That Eliminates Risk and Improves Reliability | *Epec* [online]. Copyright © 2022 Copyright Epec, [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- [45] Sony / Murata Konion US18650VTC6 3000mAh - 30A button top - 18650 - Li-ion - Rechargeable batteries | NKON. Home page | *NKON* [online]. [cit. 25.04.2022] Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/rechargeable/li-ion/18650-size/sony-konion-us18650vtc6-3120mah-30a-met-button-top.html>
- [46] LG ICR18650-HG2 3000mAh - 20A - 18650 - Li-ion - Rechargeable batteries | NKON. Home page | *NKON* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/lg-18650-hg2-without-warning.html>
- [47] Molicel INR21700-P42A 4000mAh - 45A - 21700 & 20700 - Li-ion - Rechargeable batteries | NKON. Home page | *NKON* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/rechargeable/li-ion/21700-20700-size/moliceel-21700a-4200mah-30a.html>
- [48] Lithium Werks (former A123 systems) ANR26650M1-B 2500mAh - 50A LifePo4 - 3.2V - 26650 - LiFePO4 - Rechargeable batteries | NKON. Home page | *NKON* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/a123-systems-anr26650m1b-a-grade-3-3v-a-grade.html>
- [49] Tiskové struny do 3D tiskáren | *Filament PM* [online]. Copyright © [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg-frjet-samozhasivy-cerna-1-75-mm-0-5-kg/p173?fileId=435&do=downloadFile>



- [50] Integrované obvody pro řízení BLDC motorů | Vývoj.HW.cz. Vývoj.HW.cz | *Profesionální elektronika* [online]. Copyright © 1997 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/integrované-obvody-pro-řízení-blcd-motoru.html>
- [51] Understanding ESC & VESC in Electric Skateboard: How to choose? - Electric Skateboard HQ. Home - *Electric Skateboard HQ* [online]. Copyright © Copyright 2022 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.electricskateboardhq.com/understanding-electronic-speed-controller-esc-and-vesc/>
- [52] IoT ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth rev.1, CP2102 | *LaskaKit. LASKARDUINO.cz | by Makers for Makers* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/>
- [53] ASAIR senzor teploty a vlhkosti vzduchu DHT22 | *LaskaKit. LASKARDUINO.cz | by Makers for Makers* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-senzor-teploty-a-vlhkosti-vzduchu-dht22/>
- [54] UMW DS18B20 Digitální čidlo teploty TO-92 | *LaskaKit. LASKARDUINO.cz | by Makers for Makers* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/dallas-digitalni-cidlo-teploty-ds18b20--to-92/>
- [55] Infračervený teploměr MLX90614ESF-BAA | *LaskaKit. LASKARDUINO.cz | by Makers for Makers* [online]. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/infracerveny-teploměr-mlx90614esf-baa/>
- [56] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. 3. vydání. Brno: Computer Press, 2021. Učebnice (Computer Press). ISBN 978-80-251-5028-3.
- [57] Alcomex | vše pro vaše technické, průmyslové a vratové pružiny » Alcomex. Alcomex | vše pro vaše technické, průmyslové a vratové pružiny » Alcomex [online]. Copyright © 2017 [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: https://www.alcomex.cz/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=hp
- [58] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [59] Castor Wheels Roll Resistance - Bulldog Castors Blog. Castors Online, Caster Wheels. Castor Wheels, Casters, *Trolley Wheels* [online]. Copyright © 2014. All rights reserved [cit. 20.05.2022]. Dostupné z: <https://www.bulldogcastors.co.uk/blog/castor-wheels-roll-resistance/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m/s ²]	Podélné zrychlení
BLDC	[-]	Brushless Direct Current
BMS	[-]	Battery Management System
c	[N/mm]	Tuhost pružiny
C_1	[Ah]	Minimální kapacita akumulátoru
C_{celk}	[Ah]	Nominální kapacita
C_d	[-]	Součinitel aerodynamického odporu
C_m	[mAh]	Minimální kapacita
d_1	[mm]	Průměr článku
D_k	[mm]	Průměr kola
D_{kola}	[mm]	Průměr kola
DKP	[-]	Double King Pin
E_1	[Wh]	Množství energie uložené v akumulátoru
E_{celk}	[Wh]	Celková energie uložená v akumulátoru
ESC	[-]	Electronic Speed Control
f	[-]	Koeficient valivého odporu
F_1	[N]	Hnací síla motoru (varianta 1)
F_2	[N]	Hnací síla motoru (varianta 2)
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
$F_{\text{hnací}}$	[N]	Hnací síla
F_{p1}	[N]	Síla pružiny (varianta 1)
F_{p2}	[N]	Síla pružiny (varianta 2)

g	$[m/s^2]$	Tíhové zrychlení
I_1	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti motoru
I_2	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti pastorku
I_3	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti řemenice
I_4	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti kola
I_{max}	$[A]$	Maximální odebíraný proud
I_{red}	$[kg \cdot mm^2]$	Moment setrvačnosti moment setrvačnosti
i_{1p}	$[-]$	Předběžný převodový poměr (varianta 1)
i_{2p}	$[-]$	předběžný převodový poměr (varianta 2)
$i_{1,2s}$	$[-]$	Skutečný převodový poměr (varianta 1,2)
$LiFePO_4$	$[-]$	Lithium-železo-fosfátová chemie akumulátoru
l_1	$[mm]$	Délka článku
L_1	$[mm]$	Vypočítaná délka pružiny (varianta 1)
L_2	$[mm]$	Vypočítaná délka pružiny (varianta 1)
L_n	$[mm]$	Délka v max. přípustném stlačení pružiny
L_0	$[mm]$	Délka ve volném stavu
$L_{w1,2}$	$[mm]$	Osové vzdálenosti varianty 1,2
m	$[kg]$	Hmotnost posuvných částí
$M_{1,2}$	$[Nm]$	Hnací moment
$M_{max.motor}$	$[Nm]$	Hodnota maximálního momentu motoru
$M_{přední_kola}$	$[Nm]$	Moment odporu zrychlení předních kol
M_{red}	$[Nm]$	Redukovaný moment
η	$[-]$	Účinnost řemenového převodu
$n_{max.motor}$	$[min^{-1}]$	Maximální otáčky motoru
$\eta_{řemen}$	$[-]$	Mechanická účinnost řemenového převodu
NTC	$[-]$	Negative Temperature Coefficient

n_{kola1p}	$[\text{min}^{-1}]$	Předběžné otáčky kola (varianta 1)
n_{kola1s}	$[\text{min}^{-1}]$	Skutečné otáčky kola (varianta 1)
n_{kola2p}	$[\text{min}^{-1}]$	Předběžné otáčky kola (varianta 2)
n_{kola2s}	$[\text{min}^{-1}]$	Skutečné otáčky kola (varianta 2)
$O_{aerodynamický}$	[N]	Aerodynamický odpor
$O_{posuvné}$	[N]	Odpor posuvných částí
$O_{rotační}$	[N]	Odpor rotačních částí
$O_{stoupání}$	[N]	Odpor stoupání
$O_{valivý}$	[N]	Valivý odpor
$O_{zrychlení}$	[N]	Odpor zrychlení
$P_{\text{max.celk}}$	[W]	Špičkový výkon
p_m	[-]	Počet článků paralelně
R_2	[mm]	Poloměr pastorku
R_3	[mm]	Poloměr řemenice
RKP	[-]	Reverse Kingpin
S_x	$[\text{m}^2]$	Čelní plocha
S_m	[-]	Počet článků v sérii
TKP	[-]	Traditional Kingpin
U_m	[V]	Nominální napětí článku
U_1	[V]	Nominální napětí článku
U_{celk}	[V]	Nominální napětí celého akumulátoru
v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlost
V_1	$[\text{mm}^3]$	Objem jednoho článku
$v_{\text{max}1,2}$	[m/s]	Maximální hodnota rychlosti (varianta 1,2)
Z_{1p}	[-]	Předběžný počet zubů řemenice (varianta 1)
Z_{1s}	[-]	Skutečný počet zubů řemenice (varianta 1)

z_{2p}	[–]	Předběžný počet zubů řemenice (<i>varianta 2</i>)
z_{2s}	[–]	Skutečný počet zubů řemenice (<i>varianta 2</i>)
z_p	[–]	Počet zubů pastorku
α	[$rad \cdot s^{-2}$]	Úhlové zrychlení rotačních částí
β	[–]	Úhel nakloněné roviny
ρ_m	[Wh/kg]	Hmotnostní e. hustota
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	Hustota vzduchu
ρ_m	[Wh/kg]	Hmotnostní energetická hustota
ρ_v	[Wh/l]	Volumetrická energetická hustoty
ω_1	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost motoru
ω_2	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost pastorku
ω_3	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost řemenice
ω_4	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost kola

SEZNAM PŘÍLOH

Název	Formát přílohy
Priloha_1_191806	MATLAB Live Script (.mlx)