



**FAKULTA
ŠTOJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh pohonu elektrického longboardu
ozubenými koly**

**Design of Gearbox to Drive an Electric
Longboard**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Martin DVOŘÁK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠTOJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Karel Petr, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **469568**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh převodovky pro pohon elektrického longboardu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Gearbox to Drive an Electric Longboard

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je návrh převodovky pro pohon elektrického longboardu. Převodovka bude tvořena pomocí plastových (polymerových) ozubených kol. Student vypracuje rešerši motorů možných použít k pohonu longboardu, rešerši možných materiálů používaných u plastových ozubených kol včetně mechanických vlastností a popíše vhodnou metodu 3D tisku ozubených kol. Dále budou provedeny návrhové, pevnostní a kontrolní výpočty všech částí převodovky. Grafický výstup - sestavný výkres převodovky, výrobní výkresy dvou vybraných dílů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spojce a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [2] Joseph E. Shigley: Konstruování strojních součástí. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] FREDERICK E. GIESECKE. Technical Drawing with Engineering Graphics. 2014. Pearson New International Edition. ISBN 13: 9781292026183.
- [4] Katalogy výrobců.
- [5] Manuál programu KISSsoft.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Karel Petr, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

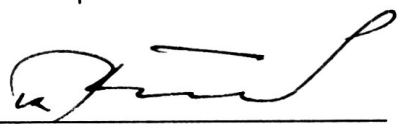
Datum zadání bakalářské práce: **05.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **12.12.2019**


Ing. Karel Petr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. František Kopřiv, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

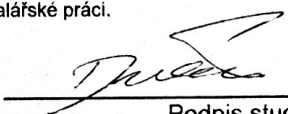

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

20.4. 2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: Návrh pohonu elektrického longboardu ozubenými koly vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Petra, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze:

.....

Martin Dvořák

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Karlu Petrovi, Ph.D. za možnost psát práci na vybrané téma, poskytnutí odborných rad a věcných připomínek. Dále pak mým rodičům za podporu, konzultace a pomoc při realizaci.

Anotační list

Jméno autora: Martin Dvořák

Název BP: Návrh pohonu elektrického longboardu ozubenými koly

Anglický název: Design of Gearbox to Drive an Electric Longboard

Rok: 2019

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojího inženýrství

Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí BP: Ing. Karla Petra, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran 43

počet obrázků 36

počet tabulek 4

počet příloh 5

Klíčová slova: Elektrický longboard, 3D tisk, ozubený převod, plastová ozubená kola

Keywords: Electric longboard, 3D print, gear drive, plastic gears

Anotace: Teoretická část práce se zabývá druhy pohonů elektrických longboardů, druhy ozubení a možnostmi 3D tisku ozubení. Praktická část se zabývá návrhem a realizací pohonu elektrického longboardu ozubenými koly, vyrobenými metodou FDM.

Abstract: The theoretical part of the thesis deals with types of drives of electric longboards, types of gearing and possibilities of 3D printed gearing. The practical part deals with the design and realization of electric longboard gear drive using FDM technology.

Obsah

1. Úvod	1
2. Elektrický longboard	2
2.1. Historie	2
2.2. Komponenty	4
2.2.1. Desky	4
2.2.2. Trucky	5
2.2.3. Kola a ložiska	6
2.3. Používané motory	7
2.4. Možnosti přenosu výkonu.....	8
2.5. Elektronika a baterie.....	10
3. 3D tisk a technologie FDM.....	11
3.1. Příprava tisku a důležité parametry.....	11
3.2. Konstruování s ohledem na 3D tisk	12
4. Návrh převodovky	13
4.1. Návrh ozubeného soukolí	14
4.1.1. Volba typu ozubení	14
4.1.2. Návrh převodového poměru	15
4.1.3. Volba materiálu	17
4.1.4. Výpočty	18
4.1.4.1. Rozměry potřebné pro výpočty ložisek.....	20
4.1.5. Ověření výpočtů	21
5. Konstrukce a realizace	23
5.1. Pastorek.....	23
5.2. Kolo 2.....	24
5.3. Kolo 3.....	25
5.3.1. Výpočet sil a ložisek	25
5.4. Návrh převodové skříně.....	28
5.5. Cad model.....	30
5.6. Použitá tiskárna.....	30
5.7. Parametry tisku.....	31
5.7.1. Nylon	31
5.7.2. ABS	32
5.8. Dokončovací operace	33
5.9. Sestavení	33
5.10. Záběh	35
6. Zhodnocení výrobní metody.....	36
7. Závěr	38
Použitá literatura.....	39
Seznam obrázků	41
Seznam tabulek	42
Seznam příloh.....	43

1. Úvod

Elektrické longboardy v dnešní době zažívají značný rozmach. Jde o longboard doplněný o elektroniku, baterie a motor, díky čemuž není za potřeby lidské energie k pohybu.

K přenosu výkonu z motoru na kolo je možné použít několik řešení. V této práci se zaměřím na přenos pomocí ozubených kol.

Převodovka bude celá zkonstruována a navržena z plastových dílů vytištěných na 3D tiskárně metodou FDM. To je takzvaně aditivní metoda výroby, kdy je objekt tvořen postupným nanášením vrstev na sebe do požadovaného tvaru, místo běžného odebrání materiálu jako při konvenční výrobě.

Bude řešena problematika plastových ozubených kol a orientace dílů na tiskové podložce s ohledem na pevnost a funkci. Sestavení převodovky a její funkčnost, včetně kladů a záporů plastu, jako konstrukčního materiálu.

2. Elektrický longboard

Elektrický longboard vzniknul z klasického longboardu přidáním elektromotoru a dalších potřebných součástí, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

2.1. Historie

První skateboardy začaly vznikat v 50. letech 20. století v Americe, hlavně na místech, kde bylo populární surfování – např. Hawai nebo Kalifornie. V počátcích si je lidé vyráběli přimontováním podvozku kolečkových bruslí na dřevěnou desku (Obr. 1), později začaly vznikat první komerční skateboardy, které se dále vyvíjely do několika různých směrů.



Obrázek 1.: První skateboardy [1]

V zásadě jsou to skateboardy, které mají vždy podobný tvar a rozměr desky a používají se na různé triky a ježdění ve skateparku. Longboardy, jak už jejich název napovídá jsou v porovnání se skateboardy větší a jsou určeny převážně na ježdění. Liší se v mnoha ohledech. Je k dostání velké množství tvarů desek podle preferencí a využití [1,2].



Obrázek 2.: Skateboard vs longboard [2]

První motorové skateboardy se objevily v 70. letech. Byly poháněny spalovacími motory (obr. 3) a kvůli své váze a hlučnosti si nezískaly dostatečnou oblibu pro masové rozšíření.

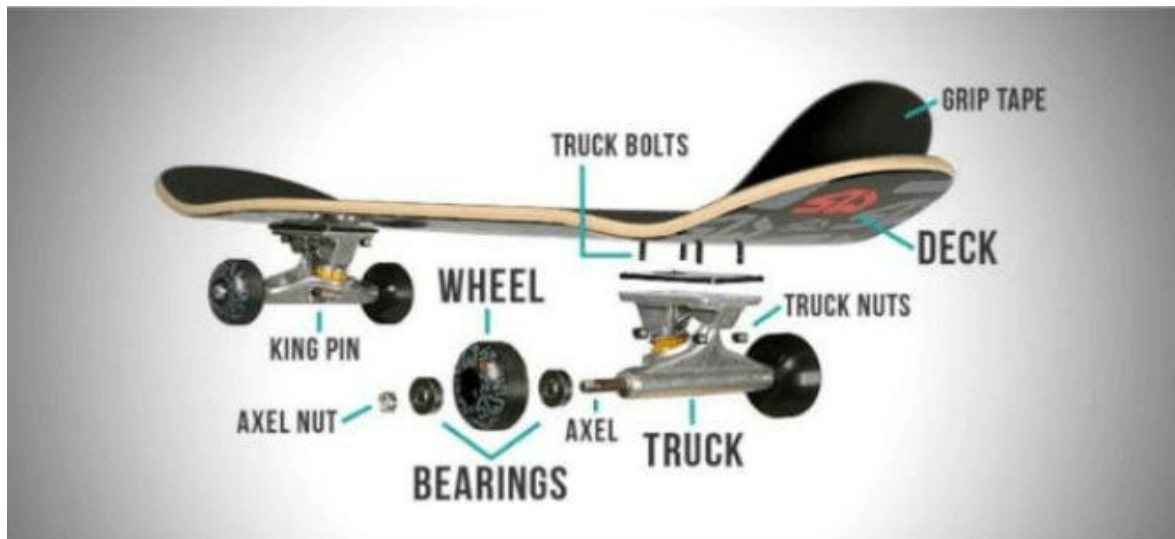


Obrázek 3.: První motorizované skateboardy [3]

První elektrický skateboard se objevil v 90. letech a začal se v Americe postupně stávat hitem. K rozšíření do Evropy došlo o pár let později. Následkem tohoto rozšíření byly stále častější nehody a zranění, které způsobily, že jednotlivé státy začaly elektrické longboardy omezovat nebo zakazovat. V České republice zatím k žádnému omezení nedošlo, ale člověk na elektrickém longboardu je považován za chodce a z toho vyplývají pravidla pro pohyb ve veřejném prostranství [3].

2.2. Komponenty

Longboardy a stejně tak skateboardy (viz obr. 4) se skládají z několika základních komponent. Vhodnou kombinací těchto součástí lze upravovat výsledné vlastnosti longboardu. [2].



Obrázek 4.: díly skateboardu/longboardu [2]

2.2.1. Desky

Longboardové desky jsou nejčastěji vyráběny z tenkých vrstev kanadského javoru nebo bambusu, které jsou vrstveny na sebe. Mohou být kombinovány i s dalšími materiály, jako je uhlíková tkanina, nebo hliník, pro zpevnění a úpravu vlastností.

Základním parametrem jsou rozměry. Podstatná je vzdálenost mezi trucky, anglicky zvaná wheel base, na jejíž délce závisí schopnost zatáčení longboardu. Čím je wheel base kratší, tím menší poloměr zatáčky dokáže longboard projet. Delší longboard naopak poskytuje vyšší stabilitu obzvláště při vyšších rychlostech.

Dalším parametrem je pružnost desky. Takzvaný flex. Pokud je deska pružná, jízda na ní bude pohodlnější a hladší. Nevýhodou je ztráta citu a kontaktu s povrchem vozovky. Proto se pro sjíždění kopců a vysoké rychlosti volí desky co nejtvrdší.

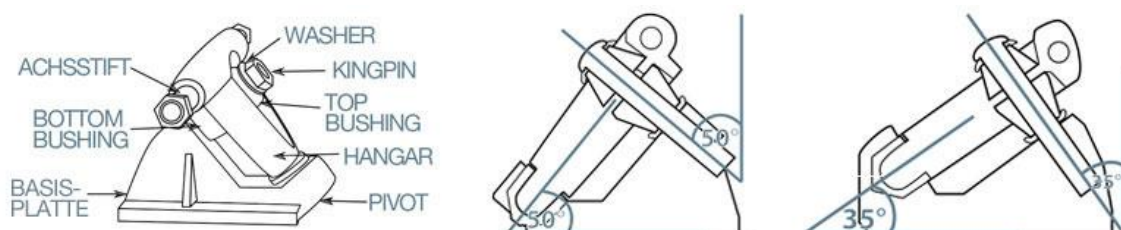
Dále můžeme desky rozlišovat podle tvaru. Ten se odvíjí od určení desky (Obr.5). Downhill a freeride desky jsou určeny na sjíždění kopců. Downhill desky jsou určeny k agresivnější jízdě a na rozdíl od freeride desek mívají tvarem jasně určeno, kde je přední a kde zadní část. Carving desky mají v po stranách trucků zúžení, které dovoluje prudké zatáčky bez rizika kontaktu kol a desky. Cruising desky jsou kratší a jsou určeny převážně na ježdění po městě s ohledem na dobrou manévrovatelnost [4].



Obrázek 5.: Typy longboardových desek [4]

2.2.2. Trucky

Trucky jsou základem podvozku longboardu. Dvě základní části jsou hanger, na který jsou přimontovaná kola, a base plate, který je přimontovaný k desce. Mezi nimi jsou tzv, bushingy a jsou spojeny šroubem nazývaným kingpin. Důležitou roli hraje úhel, který baseplate a hanger svírají. Čím je úhel větší, tím longboard lépe zatáčí, nižší úhel naopak zajišťuje lepší stabilitu při vysokých rychlostech. Běžně mívají trucky úhel okolo 45°.(Obr. 6).



Obrázek 6.: Součásti a geometrie trucku [4]

Důležitou roli s ohledem na výsledné vlastnosti hrají bushingy. Ty se vyrábějí v různých tvarech a tvrdostech. Díky tomu lze dosáhnout různých nastavení dle osobních preferencí. Základními tvary jsou válec a kužel, které se dále modifikují (Obr. 7). Pro carvingový styl ježdění, kde se jezdí podobným stylem jako na snowboardu, se používají dva kuželové bushingy, které nabízejí velkou točivost. Naopak pro downhillové použití jsou nejlepší dva válcové bushingy, které poskytují vysokou stabilitu. Tvrdost se volí podle váhy jezdce a její mírnou úpravu je možné provést utažením kingpinu a tím způsobenému předepnutí [4].



Obrázek 7.: Tvary bushingů. 1- kužel, 3- válec [4]

2.2.3. Kola a ložiska

Kola, vyráběná z kombinace polyuretanu a plastu, mohou mít různé tvary a rozměry. Zatímco ostatní komponenty se na elektrický longboard volí podle osobních preferencí, kola nabízejí značně omezenější výběr. Kvůli řemenici nebo ozubenému kolu pro přenos výkonu je nutné, aby kola měla dostatečný průměr (80mm a více) a řemenice nebyla vystavena častým nárazům od vozovky. Zároveň je nutné ji nějak uchytit na kolo, a proto se volí kola s plastovým odkrytým jádrem, které poskytuje prostor pro uchycení (obr. 8,9) [4,5].



Obrázek 9.: Orangatang Caguama [5]



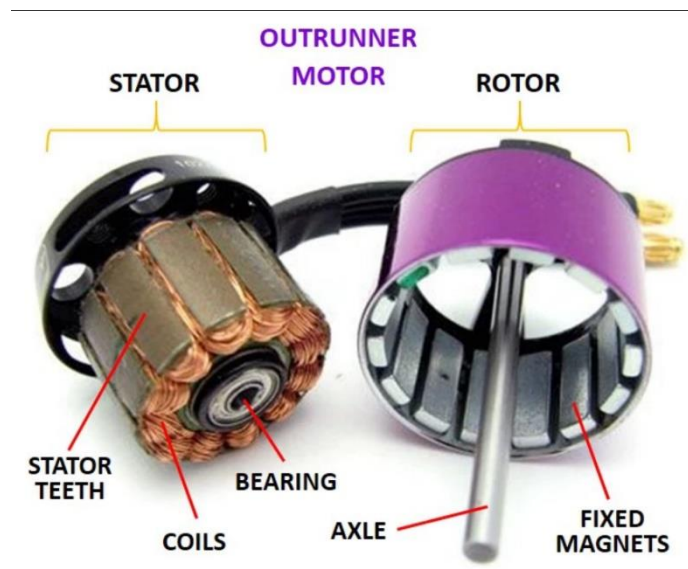
Obrázek 8.: ABEC 11 Flywheels [5]

Kvalita ložisek není vzhledem k výkonu motoru pro elektrický longboard tak podstatná jako pro klasický. Používá se typ kuličkových ložisek 608 a výrobci udávají ke svým ložiskám ještě hodnotu ABEC, která definuje tolerance při výrobě. Moderním trendem jsou keramická ložiska, která lépe odolávají teplu a vlhkosti [4].

2.3. Používané motory

Pro pohon je možné použít stejnosměrný elektromotor, tzv. DC motor, nebo bezkartáčový stejnosměrný motor, takzvaně BLDC. Vzhledem k tomu, že u BLDC motoru dokážeme při shodných rozměrech dosáhnout násobně vyššího výkonu a vyšší efektivity, využívají se téměř výhradně BLDC motory.

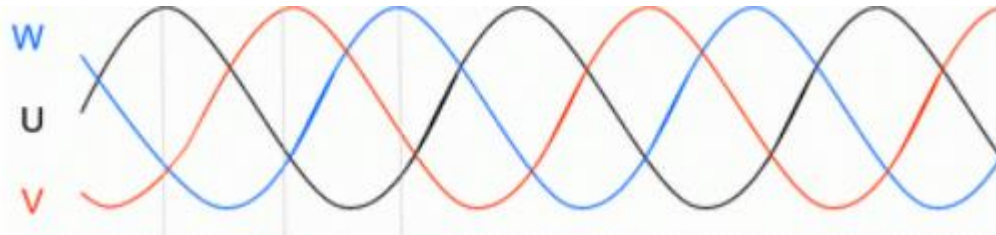
Stator BLDC motoru je tvořen třemi budícími vinutími zapojenými do hvězdy, rotor je tvořen permanentními magnety. U modelářských motorů jsou často součástí vnějšího krytu motoru, který celý koná rotační pohyb. Stator je spojen pouze s čelní stranou motoru, přes kterou se motor uchytí (Obr. 10).



Obrázek 10.: BLDC motor [6]

Řídící jednotka BLDC motorů napájená stejnosměrným napětím otevírá v závislosti na poloze motoru FET tranzistory pro jednotlivá vinutí. Tím se vytváří točivé pole a motor získává rotační energii. V závislosti na frekvenci se také řídí rychlost otáčení motoru. Princip BLDC motoru

můžeme přirovnat k fungování 3 fázového synchronního motoru, který je rovněž tvořen budícími cívkami a permanentními magnety [7].



Obrázek 11.: Průběh napětí na jednotlivých vinutích[7]

Při použití klasického BLDC motoru je nutné použít držák motoru a např. řemenici a řemen, kterým přeneseme výkon na kolo longboardu. Výhodou je možnost snadné změny převodu, a tedy i výsledné maximální rychlosti a kroutícího momentu.

Další možností je tzv. hub motor (Obr. 12). To je BLDC motor, který je integrovaný přímo do kola longboardu. Jeho rotor je pokrytý vyměnitelnou vrstvou polyuretanu. To zhoršuje chlazení a výkony hub motorů jsou oproti běžným motorům nižší. Nemůžeme volit ani typ kol a převodový poměr. Výhodou je naopak tichý chod a téměř nulová údržba [8].



Obrázek 12.: Hub motor [10]

2.4. Možnosti přenosu výkonu

Pro přenos výkonu z motoru na kolo je možné použít několik způsobů.

- Řemen:** Řemenový převod je nejrozšířenějším řešením. Díky své jednoduchosti a snadné změně převodového poměru se stal velmi oblíbeným v komunitě hobby stavitelů. Nevýhodou je nutnost relativně časté údržby a také větší tření, a tím způsobená vyšší spotřeba a rychlé zpomalování bez aktivovaného motoru.

Na obrázku 13 je můj vlastní návrh řemenového pohonu. Vzhledem k silám působícím v řemenovém převodu se plastový držák velmi rychle unavil a zlomil, proto se ukázalo použití plastu v tomto případě jako nevhodné.



Obrázek 13.: Řemenový pohon

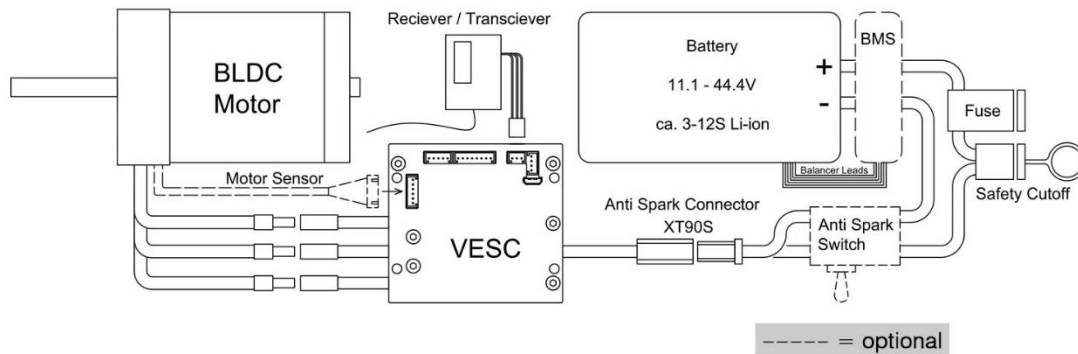
- **Hub:** výhody a nevýhody hub motoru byly popsány v kapitole 2.3. Převážně kvůli své bezúdržbovosti jsou nejčastější volbou komerčních výrobců.
- **Ozubená kola:** principem tohoto řešení je vyměnit řemeny a řemenice náročné na údržbu za trvanlivější ozubená kola. Síly v ozubených kolech působí držáku motoru mnohem menší namáhání než řemen a nevzniká zde tak velké tření, proto se snižuje spotřeba elektrické energie a je možné longboard používat i bez aktivního pohonu.
- **Direct drive:** je novinkou, kdy jsou motory součástí hangeru trucku. V současné době jsou tyto systémy velmi drahé a nepříliš otestované. Kombinují ale většinu výhod ostatních řešení.



Obrázek 14.: Direct drive systém [11]

[9]

2.5. Elektronika a baterie



Obrázek 15.: Schéma zapojení [10]

Nejčastěji používané baterie do elektrických longboardů, stejně jako do ostatních elektrických vozidel, jsou baterie na bázi lithia. Ty se dělí na dvě skupiny.

První skupinou jsou Li-ion baterie. Mají válcový tvar, záporná elektroda je tvořena grafitem, kladná sloučeninami lithia. Elektrolyt v Li-ion bateriích je tekutý. Jejich nevýhodou je poměrně nízký počet cyklů. Baterie začínají ztrácet kapacitu už při 300 – 500 cyklech.

Alternativou k Li – ion článkům jsou Li-pol články. Namísto tekutého elektrolytu je elektrolyt tuhý. Katoda je tvořena oxidem lithia a kobaltu, anodu tvoří sloučeniny grafitu. Obě elektrody jsou tenké vrstvy, proto jsou výsledné baterky ploché, nebo mají tvar kvádru. Při stejné hmotnosti mají Li-pol články vyšší kapacitu, ale také větší objem.

Oba typy baterií mají nominální napětí 3,6V. Jsou proto spojovány do série, nejčastěji po 10 nebo 12 článcích. Pro navýšení kapacity a zajištění dostatečných proudů jsou články spojovány paralelně k sobě.

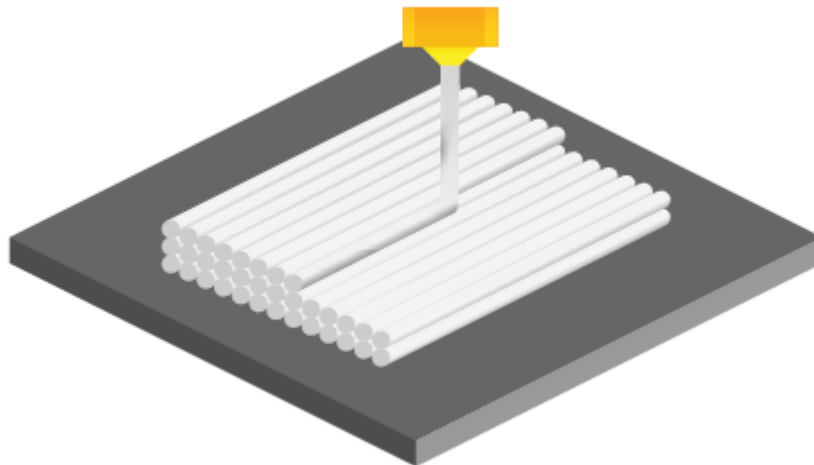
Rizikem baterií na bázi lithia je jejich citlivost na správné nabíjení a vybíjení. Překročení limitních hodnot napětí může baterii zcela zničit. Při poškození baterie hrozí riziko požáru, který je v případě lithia téměř neuhasitelný.

Pro řízení motoru se nejčastěji používají jednotky založené na projektu VESC. Jejich velkou výhodou je možnost nastavení velkého množství parametrů, připojení bluetooth modulu pro zobrazování dat v telefonu, nebo měření napětí baterií a jejich ochrana [10,12].

3. 3D tisk a technologie FDM

3D tisk je takzvaná aditivní metoda výroby, což znamená, že materiál není z finálního výrobku odebírán, jako při běžném obrábění, ale je naopak přidáván.

Principem 3D tisku je nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách a postupná „stavba“ výsledného objektu. U metody FDM (fused deposition modeling), někdy zvané také jako FFF (fused filament fabrication) je materiálem tisková struna zvaná filament, která má většinou průměr 1,75mm. Ta je protlačována skrz horkou trysku, kde se materiál roztaví a je nanášen po hotových trasách do podoby finálního modelu (Obr. 26) [13,14].



Obrázek 16.: FDM tisk [12]

3.1. Příprava tisku a důležité parametry

Některé parametry pro 3D tisk se výrazně odlišují podle použitého materiálu, některé naopak zůstávají stejné. Jedním z nejdůležitějších parametrů je teplota tisku. Od té se odvíjí výsledná pevnost výtisku, kvalita jeho povrchu i mechanické vlastnosti, jako například adheze

jednotlivých vrstev, proto je důležité teplotu zvolit správně a vyvážit výsledné vlastnosti. Při volbě teploty je dobré řídit se doporučením výrobce a zkušenostmi.

Dalším neméně důležitou věcí je příprava tiskové podložky. Celá převodovka byla tištěna na skleněnou podložku, která se pro každý materiál připravuje jiným způsobem a také její teplota se pro jednotlivé materiály liší, tak aby byla přilnavost tištěného materiálu co nejlepší a nedošlo k oddělení od podložky během tisku. Přípravu jde zjednodušit také použitím speciálních fólií z různých materiálů, jako je PEI neboli podložka z polyetherimidových vláken, která je použita například u tiskáren od české firmy Prusa research s.r.o..

Pro zlepšení přilnavosti k podložce se používá také tzv. brim. Při tomto nastavení je první vrstva rozšířena o určitou šířku okolo modelu. Tím se zvětší kontaktní plocha výtisku a podložky a zabrání se odlepení během tisku. Nevýhodou je nutnost odstranit brim po dokončení tisku.

Výsledný výtisk je tvořen stěnami, mezi kterými je výplň. Tloušťku stěny nastavíme v násobcích průměru trysky neboli v počtu tzv. perimetrů. Tento parametr se odvíjí od požadavků na výtisk. Pokud nám jde pouze o vzhled a tiskneme například objekt na výstavu, stačí nám 2 perimetry a velmi malá výplň. Ta se udává v procentech a pro tento účel by stačilo pouze 10%. Pokud ale požadujeme určité mechanické vlastnosti. Volíme počet perimetrů podle konstrukce a tvaru výrobku a výplň 80 – 100% [13,14,15].

3.2. Konstruování s ohledem na 3D tisk

Při tvorbě modelu je důležité myslet na způsob výroby. Stejně jako u konvenční metody musíme myslet na to, aby součást byla vyrobitelná, musí být součástí pro 3D tisk také takzvaně tisknutelné.

Je vhodné mít dostatečnou tiskovou základnu, která bude na podložce a bude bránit uvolnění modelu z podložky během tisku. Zároveň

není vhodné vytvářet na dílech velké převisy. Software pro tisk sice vygeneruje podpory a součást vytiskne, ale povrch nad podporami mívá výrazně horší kvalitu. Převislé části můžeme nahradit například zkosením, které lze do určitého úhlu, závislého na tiskárně a materiálu, vytisknout bez podpor. Tento úhel bývá běžně okolo 45°.

Důležitá je orientace výtisku. Pevnost v tahu kolmo na vrstvy modelu bude vždy horší, než pevnost při působení rovnoběžně s vrstvami.

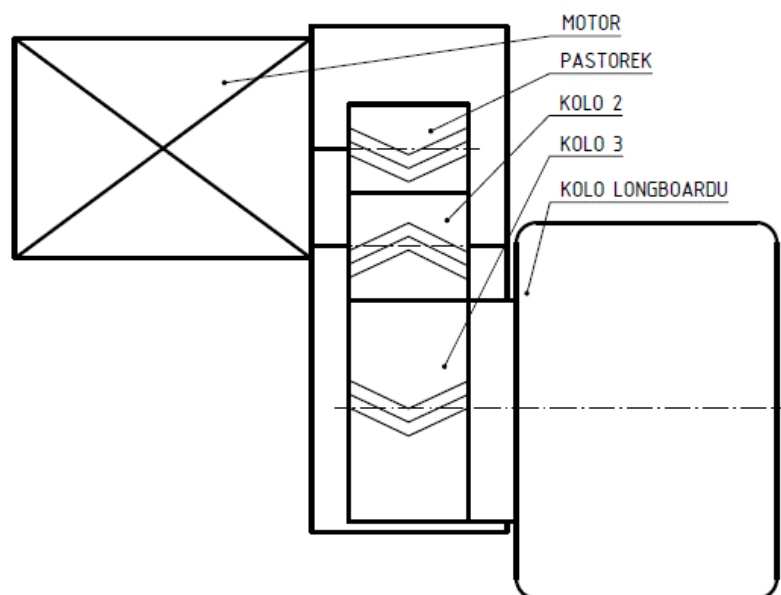
Na základě těchto poznatků se snažíme model vytvořit tak, aby výsledný výtisk měl požadované vlastnosti i funkci [13].

4. Návrh převodovky

Převodovka je konstruována v programu Autodesk Inventor 2019. Hlavní překážkou při konstrukci převodovky je omezený prostor (Obr. 18), kam ji lze na longboardu umístit. Ten je omezen z jedné strany kolečkem a z druhé profilem trucku. Celý návrh bude podřizován velikosti tohoto prostoru.



Obrázek 18.: Prostor pro převodovku



Obrázek 17.: Schéma převodovky

4.1. Návrh ozubeného soukolí

Při měření se ukázalo, že maximální využitelný prostor pro převodovku je široký 46 mm (Obr.: 19). Ten je z jedné strany ohraničený profilem trucku, kdy už by nebylo možné převodovku nijak upevnit, a z druhé strany vnitřní hranou kolečka. Do tohoto prostoru se kromě převodovky musí vměstnat také svěrný kroužek pro uchycení převodovky na truck, který je s ohledem na použité šrouby a pevnost široký 14 mm. Skříň převodovky musí mít dostatečně silnou stěnu pro ukotvení osy středního kola, která bude vyrobená z oceli a zároveň musí nést váhu motoru a vydržet síly působící v soukolí. S ohledem na všechny okolnosti budou kola široká 19 mm což se ukázalo jako dostatečné.

4.1.1. Volba typu ozubení

V převodovce budou použita ozubená kola s rovnoběžnými osami, kde se nám nabízí několik možností, jaký typ ozubení využít.

- **Přímé zuby:** tento typ ozubení je nejjednodušší pro běžnou výrobu. Celý zub je namáhán rovnoměrně a nepůsobí v něm žádné axiální síly.
- **Šikmé zuby:** u šikmých zubů dochází k postupnému vstupu do záběru, zabírá zde více zubů najednou a záběr je delší, tím se snižuje namáhání jednotlivých zubů a také je nižší mezní počet zubů. Nevýhodou naopak jsou axiální síly v ozubení, které je nutné zachycovat v ložiskách a skříni.
- **Šípové zuby:** tento typ ozubení kombinuje kladné vlastnosti přímého a šikmého ozubení. Zuby jsou méně namáhány a dokáží přenést vyšší výkon, zároveň v nich nepůsobí žádné axiální síly a není nutné využití axiálních ložisek. Hlavní nevýhodou šípového ozubení je náročnost konvenční výroby a s tím související cena.

Pro zvolenou metodu výroby pomocí 3D tisku, která téměř eliminuje hlavní nevýhodu šípového ozubení v podobě složitosti a nákladů na konvenční výrobu se jeví šípové zuby jako ideální volba pro požadovanou aplikaci. [16]

4.1.2. Návrh převodového poměru

Před návrhem převodového poměru pro převodovku jsem pro jednodušší testování vyzkoušel různé převodové poměry pomocí řemenu a řemenice. Vycházel jsem z následujících vstupních parametrů:

Požadovaná maximální rychlost v :

$$V = 40 \div 50 \text{ km/h} = 11,11 \div 13,89 \text{ m/s}$$

Motorová konstanta $KV = 213 \text{ min}^{-1}/V$

Nominální napětí baterií $U = 36 \text{ V}$

Průměr kol $d = 83 \text{ mm}$

Z hodnoty KV a nominálního napětí vypočítáme maximální otáčky motoru, ze kterých společně s otáčkami kolečka vypočtenými z maximální požadované rychlosti dostaneme výsledný převodový poměr.

Otáčky motoru:

$$n_{motor} = KV * U \tag{1}$$

$$n_{motor} = 213 * 36 = 7668 \text{ min}^{-1}$$

Odvození otáček kolečka:

$$v = \omega * \frac{d}{2} = 2 * \pi * \frac{n}{60} * \frac{d}{2} \tag{2}$$

$$n_{kolo} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d} \quad (3)$$

$$n_{kolo}^{horní} = \frac{60 \cdot 13,89}{\pi \cdot 0,083} = 3\,196,14$$

$$n_{kolo}^{dolní} = \frac{60 \cdot 11,11}{\pi \cdot 0,083} = 2\,561,14$$

Nyní už můžeme spočítat převodový poměr:

$$i = \frac{n_{motor}}{n_{kolo}} \quad (4)$$

$$i = \frac{n_{motor}}{n_{kolo}} = 2,399 \div 2,994$$

Na základě těchto výpočtů a následného testu byl zvolen převodový poměr $i = 2,6$. Při dosazení této hodnoty do výše uvedených vzorců pro výpočet otáček a rychlosti nám vyjde:

$$n_{kolo} = \frac{n_{motor}}{i} \quad (5)$$

$$n_{kolo} = \frac{7668}{2,6} = 2994,23 \text{ min}^{-1}$$

$$v = \frac{\pi \cdot n \cdot d}{60} \quad (6)$$

$$v = \frac{\pi \cdot 2994,23 \cdot 0,083}{60} = 13,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 46,85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Výsledná rychlost nezatíženého longboardu by měla dosahovat hodnoty 46,85 km/h. Reálná rychlost se poté bude odvíjet od dalších faktorů, jako je hmotnost jezdce, povrch vozovky, sklon vozovky, vítr a další vnější vlivy, proto není možné ji přesně určit. Při testování se ukázalo, že se pohybuje okolo 40 km/h na rovné vozovce, v bezvětří, s jezdce o hmotnosti 90kg. [17,18]

4.1.3. Volba materiálu

Při volbě materiálu bylo nutné zohlednit dostupnost jednotlivých materiálů ve formě filamentu pro 3D tisk, jejich vlastnosti a možnosti použité tiskárny. V úvahu připadaly tyto možnosti.

- Nylon (PA):** neboli polyamid, je semikrystalický termoplast, který je velice pevný, houževnatý, odolný vůči opotřebení a má velice nízký součinitel tření i bez mazání. Teplotně odolný je do 80°C, krátkodobě až do 100°C. Používá se na výrobu mechanických součástí, jako např. plastových šroubů, matic, ozubených kol nebo např. rotorů ventilátorů. Jako nejvhodnější



Specifikace

Material: Nylon, 1.75 mm diameter
 Weight: 1 kg/spool (2.2 lbs)
 Length: approx. 362 m
 Density at 21.5 °C: 1.157 g/cm³
 Melt Flow Index at g/10min 200°C/5kg: 3.35
 Melt Point: 210 260 °C
 Heat-Deflection-Temperature: 75 °C
 Yield Strength at 5mm/min: 65 kg/cm²
 Impact Strength: 28.3 kg/cm
 Elongation at Break: 231.3%
 Diameter: 1.75 ± 0.05 mm

Obrázek 19.: Gembird nylon

a nejlépe dostupné pro tisk se jeví PA 66.

- POM:** neboli polyformaldehyd je také semikrystalický termoplast s vysokým podílem krystalinity. Má podobné vlastnosti jako nylon, ale pro 3D tisk je méně vhodný vzhledem ke své náročnosti na tisk. Kvůli vyšší krystalinitě se při chladnutí více smršťuje a proto se odlepuje od podložky a deformuje. Teplotně odolný je až do 90°C.

- **ABS:** neboli akrylonitrilbutandienstyren je termoplastický kopolymer, který má dobré mechanické vlastnosti, je odolný proti tlakovým rázům a jeho teplotní odolnost je až 105°C. Je jedním z prvních materiálů používaných pro 3D tisk. Je možné ho leptat a lepit pomocí acetonu. Používá se v automobilovém průmyslu, při výrobě interiérů i hraček, konkrétně např. Lega.

Tabulka 1.: Důležité vlastnosti materiálů

Materiál	Napětí v tahu σ_k [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Teplotní odolnost [°C]
PA 66	80-85	2 600 – 3 000	80°C
POM	70	2 500 - 3200	90°C
ABS	45	2 150	105°C

Z uvedených materiálů byl nakonec zvolen Nylon od výrobce Gembird, odpovídající PA 66, který byl vhodnou kombinací mechanických vlastností, možností tisku a ceny (obr.18) [19].

4.1.4. Výpočty

Pro návrh ozubení byla použita aplikace Design Accelerator v programu Autodesk Inventor 2019 (viz přílohy 1 a 2). Pro kompletní výpočet bylo nutné zjistit další vlastnosti materiálu, které neudává výrobce. K tomu byla použita kniha Strojní součásti z plastu [19]. Materiál byl určen konkrétně jako PA 66(viz. Tab. 2).

Tabulka 2.: Vlastnosti PA 66

Mez únavy v ohybu σ_{FLim} [MPa]	Mez únavy v dotyku σ_{HLim} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonova konst. μ []
18	35	900	0,4

Požadovaná životnost ozubených kol $L_h = 2000h$, což pro průměrnou rychlost 15 km/h dosahovanou při testovacích jízdách znamená několikanásobně delší životnost než všechny ostatní mechanické i elektrické komponenty longboardu.

Protože aplikace neumí navrhovat šípové ozubení, byl použit návrh pro ozubení se šikmými zuby. Pro realizaci byla vygenerována kola

s poloviční šířkou, ze kterých byla zrcadlením vytvořena kola se šípovým ozubením

Při návrhu bylo nutné zohlednit průměr kolečka a z toho vyplývající omezení pro maximální rozměr největšího ozubeného kola a zároveň minimální počet zubů nejmenšího kola. K tomu bylo vzhledem k bezpečnosti nutné maximalizovat moduly soukolí. Ve finále bylo zvoleno 10 zubů na pastorku s 0,3mm korekcí, aby nedocházelo k podřezání. S těmito parametry Inventor nehlásil žádnou chybu návrhu. S modulem 1,75 má největší kolo 26 zubů a hlavový průměr 48,420 mm, což poskytuje dostatek prostoru pro převodovou skříň a zajišťuje dostatečnou vzdálenost od vozovky při jízdě.

S ohledem na bezpečnost a na to, že výrobce neudává účinnost motoru byly pro výpočet použity hodnoty příkonu. S použitými komponenty je maximální hodnota, které může příkon dosáhnout 1 800 W. S naším omezením na šířku a velikost kol by nám s tímto výkonem nevyšly kontroly na bezpečnost, proto bude používaný výkon softwarově omezen na 1 000 W. To se z hlediska užívání ukázalo na běžný provoz jako dostatečné.

V následující tabulce jsou všechny vstupní hodnoty pro výpočet bezpečnosti a finální bezpečnost. Výpočet byl proveden nejdříve pro kola 1 a 2 a následně pro kola 2 a 3. Pro druhé kolo je uvedena vždy kritičtější hodnota.

Tabulka 3.:Návrh ozubených kol

	Kolo 1	Kolo 2	Kolo 3
Počet zubů	10	17	26
Šířka kola [mm]	19	19	19
Modul [mm]	1,75	1,75	1,75
Úhel profilu [°]	20	20	20
Úhel sklonu [°]	20	20	20
Jednotková korekce	0,3	0	0
Vzdálenost os [mm]	25,636		40,040
Výkon [W]	1 000	980	960
Otáčky [min ⁻¹]	7668	4510,59	2949,23
Kroutící moment [Nm]	1,245	2,075	3,110
Účinnost	0,98		0,98
Rozměry			
Vzdálenost os [mm]	25,636		40,040
Roztečná [mm]	18,623	31,659	48,420
Základní [mm]	17,366	29,522	45,151
Patní [mm]	15,298	27,284	44,045
Hlavová [mm]	23,112	35,195	51,920
Bezpečnost			
v ohybu	1,500	1,449	1,634
V dotyku	1,449	1,466	2,026

4.1.4.1. Rozměry potřebné pro výpočty ložisek

Pro výpočet ložisek jsou potřebné ještě průměry valivých kružnic, které jsou vypočteny z rovnice (11). U soukolí 2, 3, které není korigované, platí $d_w = d$. Pro určení valivé kružnice pastorku, který je korigován, aby nedošlo při konvenční výrobě k podřezání, musíme provést výpočet.

$$a_t = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (7)$$

$$a_t = \frac{18,623 + 31,659}{2} = 25,141 \text{ mm}$$

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (8)$$

$$\alpha_t = \arctg \frac{\tan 20^\circ}{\cos 20^\circ} = 21,1728^\circ \rightarrow 0,3695 \text{ rad}$$

$$\alpha_{tw1,2} = \arccos \cdot \left(\frac{a_t}{a_{tw}} \cdot \cos \alpha_t \right) \quad (9)$$

$$\alpha_{tw1,2} = \arccos \cdot \left(\frac{25,141}{25,636} \cdot \cos 21,1728^\circ \right) = 23,8666^\circ \rightarrow 0,4166 \text{ rad}$$

$$\alpha_{tw2,3} = \arccos \cdot \left(\frac{a_t}{a_{tw}} \cdot \cos \alpha_t \right) \quad (10)$$

$$\alpha_{tw2,3} = \arccos \cdot \left(\frac{40,040}{40,040} \cdot \cos 21,1728^\circ \right) = 21,1728^\circ \rightarrow 0,3695 \text{ rad}$$

$$d_{w1} = d_1 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{tw}} \quad (11)$$

$$d_{w1} = 18,623 \cdot \frac{\cos 21,1728^\circ}{\cos 23,8666^\circ} = 18,9897 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = d_2 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{tw}} \quad (12)$$

$$d_{w2} = 31,659 \cdot \frac{\cos 21,1728^\circ}{\cos 23,8666^\circ} = 32,2823 \text{ mm}$$

[21]

4.1.5. Ověření výpočtů

Pro ověření byly použity vzorce z [16] v kombinaci s přílohami 1 a 2. Výpočty jsou provedeny pro pastorek.

$$w_{Ft} = w_{Ht} = \frac{F_t}{b_w} \quad (13)$$

$$w_{Ft} = \frac{131,12}{19} = 6,901 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$\sigma_F = \frac{w_{Ft}}{m_n} * Y_F * Y_\varepsilon * Y_\beta \leq \sigma_{FP} \quad (14)$$

$$\sigma_F \leq \sigma_{FP} = \frac{6,901}{1,75} * 2,63697 * 0,79398 * 0,83333 = 6,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{w_{Ht}}{d_1} * \frac{u+1}{u} * Z_H * Z_M * Z_\varepsilon} \leq \sigma_{HP} \quad (15)$$

$$\sigma_H \leq \sigma_{HP} = \sqrt{\frac{6,901}{18,623} * \frac{1,7+1}{1,7} * 2,21877 * 18,4674 * 0,89936} = 28,271 \text{ MPa}$$

$$Z_M = \sqrt{\frac{2}{\pi * \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}} \quad (16)$$

$$Z_M = \sqrt{\frac{2}{\pi * \left(\frac{1-0,4^2}{900} + \frac{1-0,4^2}{900}\right)}} = 18,4674$$

$$k_F = \frac{\sigma_{Flim}}{\sigma_{FP}} \quad (17)$$

$$k_F = \frac{18}{6,88} = 2,616$$

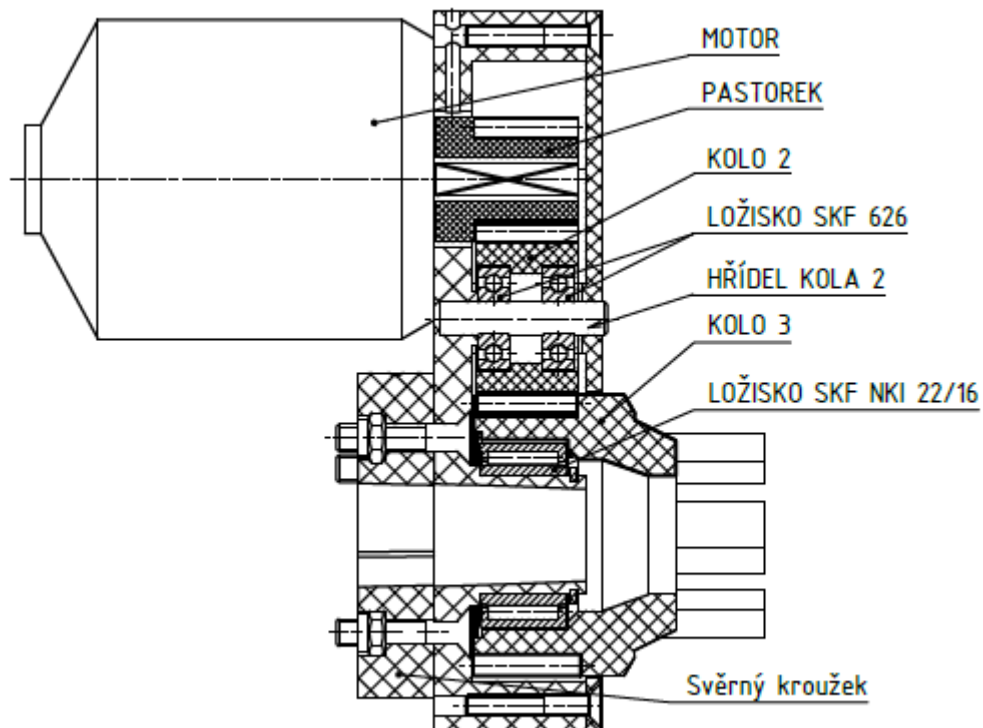
$$k_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_{HP}} \quad (18)$$

$$k_H = \frac{35}{28,271} = 1,238$$

Ze vzorového výpočtu vidíme, že bezpečnost v ohybu, vypočtená programem Inventor je vzhledem k bezpečnosti pesimistická. Bezpečnost v dotyku je lehce optimističtější, než ověřovací výpočet, ale je pro všechny kola dostatečná [16].

5. Konstrukce a realizace

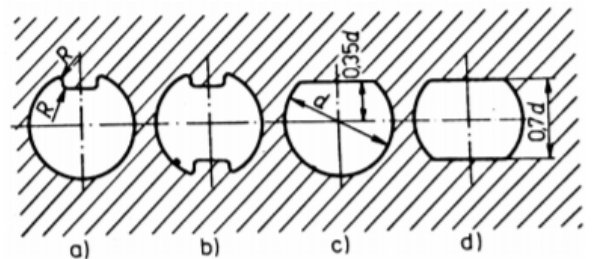
Výkres sestavy je přiložen v příloze č. 3.



Obrázek 20.: Řez sestavou

5.1. Pastorek

Při testování převodovky se jako největší problém ukázalo uložení pastorku na hřídeli motoru. Kvůli teplotě motoru, která při letních teplotách stoupá nad hranici, kdy je možné na motoru udržet ruku, docházelo při variantě c (viz Obr. 22)



Obrázek 22.: Spojení plastových pastorků a hřídelí [19]



Obrázek 21.: Ozubené kolo s vložkou

ke změknutí materiálu a protočení hřídele v náboji.

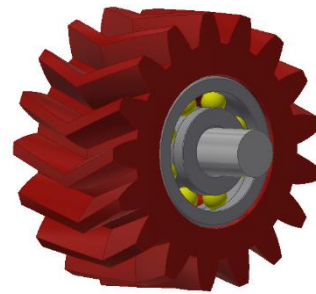
V druhé verzi jsem se pokusil „vytzužit“ dosedací plochu vložkou vyrobenou z ocelového plechu o tloušťce 0,75mm, ten byl vložen do drážky v ozubeném kole a měl zabránit protočení hřídele v ozubeném kole (Obr. 21).

Tím ale na hranách vložky vznikla místa, kde se koncentrovalo napětí a zároveň byla oslabena stěna. V těchto dvou hranách poté došlo k rozlomení pastorku a odlomený kus poničil i další spoluzabírající kola.

Finálním řešením se ukázala verze d) (obr. 22). Stále je ale nutné hlídat teplotu motoru, aby při přehřátí nedošlo ke změknutí pastorku (viz příloha 5). [19]

5.2. Kolo 2

Kolo 2 plní úlohu mezikusu mezi pastorkem a kolem 3. Zajišťuje dostatečnou vzdálenost motoru od osy trucku, které by se dvěma koly nebylo možné dosáhnout se stávající velikostí kol longboardu. Toto řešení by bylo konstrukčně jednodušší, ale vyvstaly by další problémy s rizikem kontaktu kola a desky a tím způsobeného zablokování kola, které by bylo při dosahovaných rychlostech velmi nebezpečné.

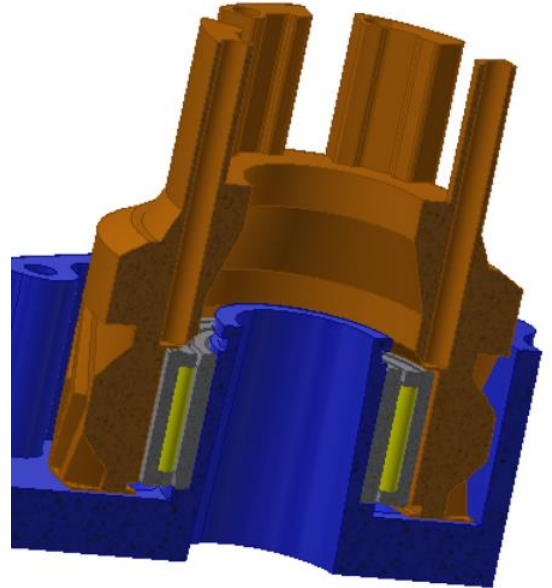


Obrázek 23.: Kolo 2

Kolo je uloženo na ocelové hřídeli nalisované do převodové skříně. Do kola jsou nalisována dvě kuličková ložiska typu 626 a ve skříně i na víku skříně je 1 mm osazení, které vymezuje polohu kola (obr. 23).

5.3.Kolo 3

Třetí kolo zajišťuje přenos výkonu z převodovky na kolo longboardu. Jádro kola longboardu je plastové a má v sobě 6 otvorů uspořádaných do kruhu. Součástí třetího ozubeného kola je část pro přenos výkonu. Ta svým tvarem zapadá do reliéfu kola a vystupuje z ní 6 profilů, které přesně zapadají do jádra kola longboardu a tím zajišťují potřebné spojení pro přenos výkonu. Tyto profily jsou každý vyztužen závitovou tyčí M3, která je vzhledem k orientaci tisku jistí proti odlomení na spojení dvou vrstev (Obr. 24).



Obrázek 24.: Uložení kola 3

První možností uložení kola přišroubování přímo ke kolu longboardu. Tímto způsobem byla uchycena řemenice při testovacích jízdách. Přišroubování ale nezajišťuje dostatečnou souosost, proto je kolo uloženo na jehlovém ložisku, jehož vnější kroužek s jehlovou klecí je uložen uvnitř ozubeného kola a vnitřní kroužek je uložen v převodové skříni.

5.3.1. Výpočet sil a ložisek

Vzhledem k tomu, že axiální síly se v ozubení navzájem vyruší, působí v kolech pouze radiální a tečné síly.

Síly působící na soukolí 1, 2

$$\beta_{w1} = \arctg \left(\tan \beta \cdot \frac{d_w}{d} \right) \quad (19)$$

$$\beta_{w1} = \arctg \left(\tan 20 \cdot \frac{18,9897}{18,623} \right) = 20,362^\circ$$

$$\alpha_{nw1} = \arctg(\cos \beta_w \cdot \tan \alpha_{tw}) \quad (20)$$

$$\alpha_{nw1} = \arctg(\cos 20,362 \cdot \tan 23,8666) = 22,528^\circ$$

Tečná síla:

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot M_{k1}}{d_{w1}} \quad (21)$$

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot 1245}{18,9897} = 131,12 \text{ N}$$

Radiální síla:

$$F_{r1} = F_{t1} \cdot \frac{\text{tg}(\alpha_{nw})}{\cos(\beta_w)} \quad (22)$$

$$F_{r1} = 131,12 \cdot \frac{\text{tg}(22,528)}{\cos(20,362)} = 58,011 \text{ N}$$

Na kolo dva působí od pastorku stejné síly jako na pastorek, ale v opačném směru. Platí tedy:

$$F_{t21} = F_{t1} = 131,12 \text{ N}$$

$$F_{a21} = F_{a1} = 48,66 \text{ N}$$

Celková síla

$$F_{R21} = \sqrt{F_{t21}^2 + F_{a21}^2} \quad (23)$$

$$F_{R21} = \sqrt{131,12^2 + 48,66^2} = 139,86 \text{ N}$$

Síly působící v soukolí 2, 3

S použitím rovnic (19), (20), (21), (22), (23) vyjde:

$$\beta_{w2} = \text{arctg} \left(\tan 20 \cdot \frac{31,659}{31,659} \right) = 20^\circ$$

$$\alpha_{nw2} = \text{arctg}(\cos 20 \cdot \tan 21,1728) = 20^\circ$$

Tečná síla:

$$F_{t23} = \frac{2 \cdot 2075}{31,659} = 131,08 \text{ N}$$

Radiální síla:

$$F_{R23} = 131,08 \cdot \frac{\operatorname{tg}(20)}{\cos(20^\circ)} = 50,77 \text{ N}$$

Celková síla

$$F_{R23} = \sqrt{F_{t23}^2 + F_{a23}^2} = \sqrt{131,08^2 + 50,77^2} = 140,57 \text{ N}$$

Výpočet trvanlivosti ložisek kola 2

Vidíme, že síly jsou při obou výpočtech téměř stejné. Použijeme sílu vypočtenou ze soukolí 2, 3. S ohledem na použití dvou ložisek v jednom kole je síla působící na jedno ložisko poloviční.

Byly použity ložiska SKF 626

Data výpočtu

Základní dynamická únosnost	C	2.34	kN
Základní statická únosnost	C ₀	0.95	kN
Mezní únavové zatížení	P _u	0.04	kN

Obrázek 25.: Parametry ložiska SKF 626 [20]

$$L_h = \left(\frac{C}{F}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * n} \quad (24)$$

$$L_h = \left(\frac{2340}{70,285}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 4510,59} = 136\,356,24 \text{ h}$$

Výpočet trvanlivosti ložiska kola 3

V kole 3 bylo použito jehlové ložisko NKI 22/16. Síla působící na kolo 3 je stejná jako na kolo 2. S použitím rovnice (24) vyjde:

Data výpočtu

Základní dynamická únosnost	C	15.7	kN
Základní statická únosnost	C ₀	26	kN
Mezní únavové zatížení	P _u	3.1	kN

Obrázek 26.: Parametry ložiska SKF NKI 22/16 [20]

$$L_h = \left(\frac{15700}{70,285}\right)^3 * \frac{10^6}{60 * 2949,23} = 62\,987\,027,92 \text{ h}$$

Z výpočtů vyplývá, že ložiska jsou výrazně předimenzována. Je to způsobeno tím, že prioritní u volby ložisek byly vhodné rozměry a dostupnost na trhu. [21]

5.4.Návrh převodové skříňě

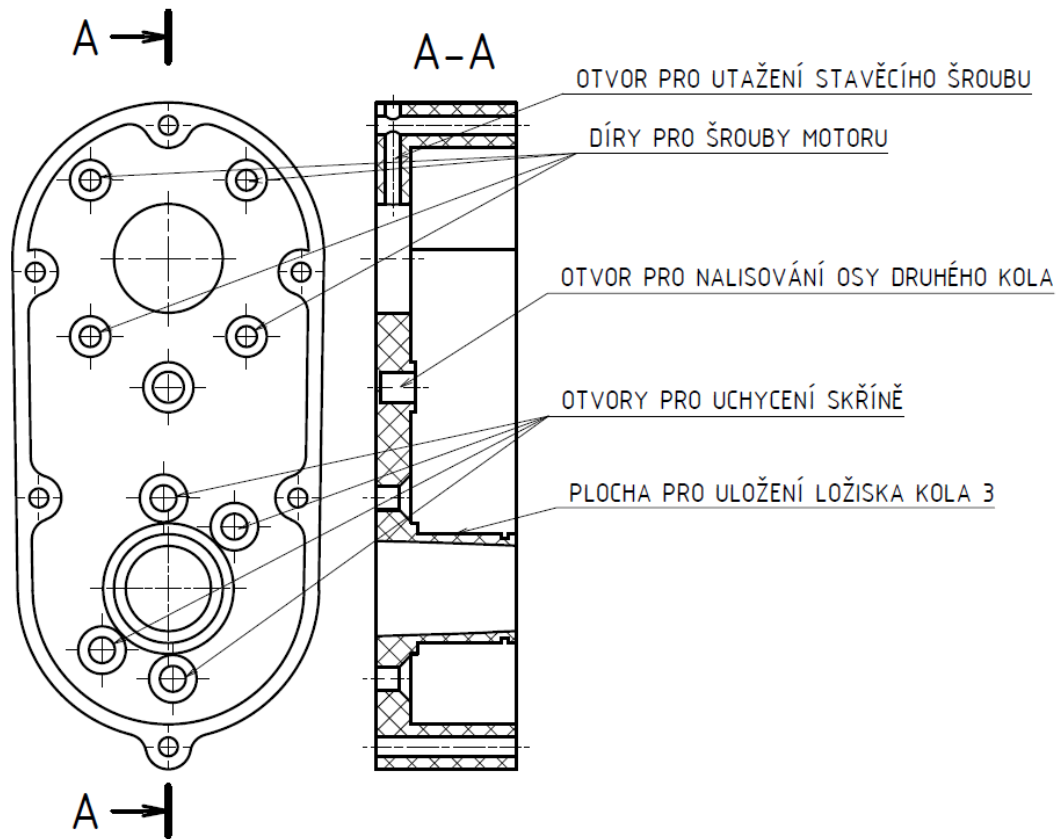
Převodová skříň (viz příloha 6) je zároveň nosnou částí motoru, musí proto být dostatečně pevná, aby byl motor pevně uchycen, skříň se nedeformovala a nedocházelo kvůli tomu k dalšímu namáhání ozubených kol. Zároveň však musí být co nejkompaktnější, musí mít správný úhel sklonu vůči desce skateboardu, aby s ní při zatočení nekolidovala, ale byla co nejdále od vozovky a co nejvíce chráněna před nerovnostmi a kamením.

Při volbě materiálu převodovky se rozhodovalo mezi ABS a PA66 použitým na výrobu kol. Oba materiály mají pro tuto aplikaci vhodné mechanické vlastnosti, ale pro tisk z PA66 má skříň velké rozměry a hrozila by teplotní deformace a z ní vyplývající nepřesnosti a nedokonalosti tisku, proto je skříň vyrobena z materiálu ABS.

Na straně uchycení na truck bylo nutné navrhnout vnitřní profil válce pro jehlové ložisko kopírující truck co nejpřesněji, aby mělo ložisko dostatečnou oporu a nedošlo k ulomení nebo nechtěnému pohybu. Na konci válce je drážka pro pojistný kroužek, který drží vnitřní kroužek jehlového ložiska na svém místě.

Osa pro středové kolo je z oceli a je do zbytku skříňě nalisována a vlepena dvousložkovým lepidlem na spojování plastů a kovů. Proti pohybu je zajištěna ještě v otvoru ve víku skříňě při smontování a tím je dosaženo souososti všech tří ozubených kol.

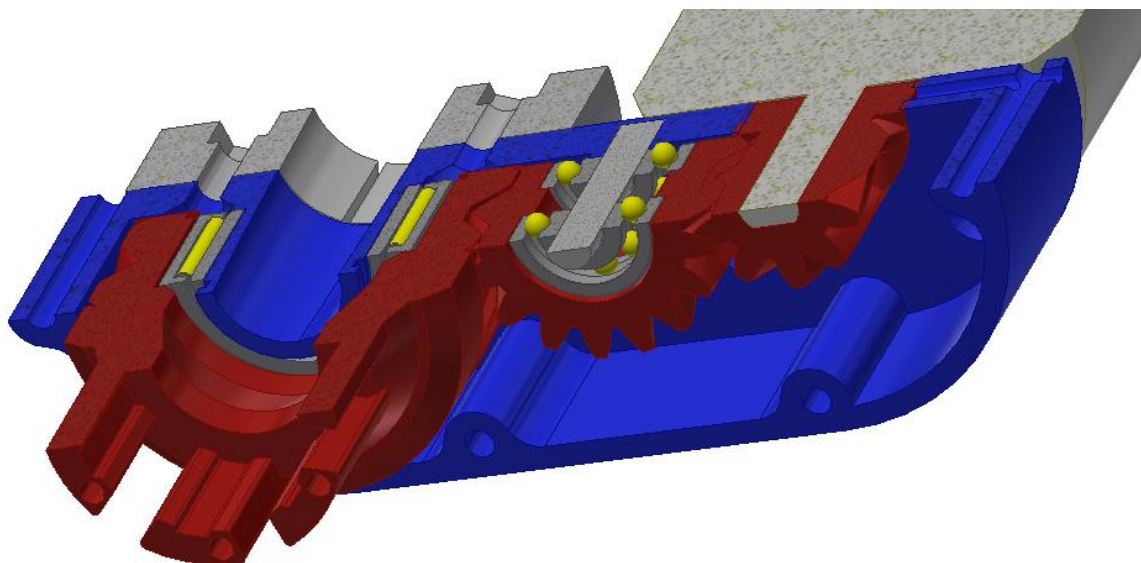
V celé skříni jsou s ohledem na nedostatek místa použity šrouby se zápusťnou hlavou, které umožňují využít celý dostupný prostor na maximum. Motor je uchycen 4 šrouby M4x12 a skříň je uchycena ke svěrnému kroužku šrouby M5x22.



Obrázek 27.: Převodová skříň

Víko skříňe má šířku 3 mm a je ke skříni připevněno pomocí 6 šroubů se zápusťnou hlavou M4x25. Délka 25 mm je zvolena s ohledem na to, že spodní stěna skříňe má tloušťku 3 mm a při vystavení nárazům od vozovky by mohla být poškozena. Šrouby vedoucí skrz celou délku stěny tedy působí jako zpevnění celé konstrukce.

5.5. Cad model



Obrázek 28.: Řez sestavou

Model je vytvořený v programu Autodesk Inventor 2019. Při pohledu na obrázek 28 lze vidět maximální možnou minimalizaci všech rozměrů.

5.6. Použitá tiskárna

Pro výrobu dílů převodovky byla použita tiskárna Geetech Prusa I3 Pro C (obr. 29). Pro lepší kvalitu výsledných výtisků byl k tiskárně doplněn vnější kryt, který zvyšuje teplotu okolo výtisku, tím zpomaluje chladnutí a zamezuje deformaci výtisku.

Jde o tiskárnu od Čínské firmy Geetech, která vyrábí 3D tiskárny. Konkrétně tento model je inspirován tiskárnami od Josefa Průši, má dvě tiskové hlavy s tryskami o průměru 0,3mm a vyhřívanou tiskovou podložku o rozměrech 20x20x18 cm.

Přesnost vytištěných dílů je dána právě použitým zařízením. U této tiskárny výrobce uvádí, že přesnost tisku je 0,1-0,3mm. Maximální velikost výtisku je pro tuto aplikaci dostatečná a maximální rozměry nejsou u žádné součásti překročeny. Maximální teplota trysky je dle výrobce okolo 240°C, reálně však tiskárna zvládá tisk při teplotě až 270°C. [22]



Obrázek 29.: Geetech Prusa i3 Pro C [20]

5.7. Parametry tisku

Tabulka 4.: Parametry tisku

Parametr	ABS	Nylon
Teplota trysky [°C]	240	254
Teplota podložky [°C]	90	90
Tloušťka stěny [mm]	1,5	1,8
Výplň [%]	100	100
Brim [mm]	5	7

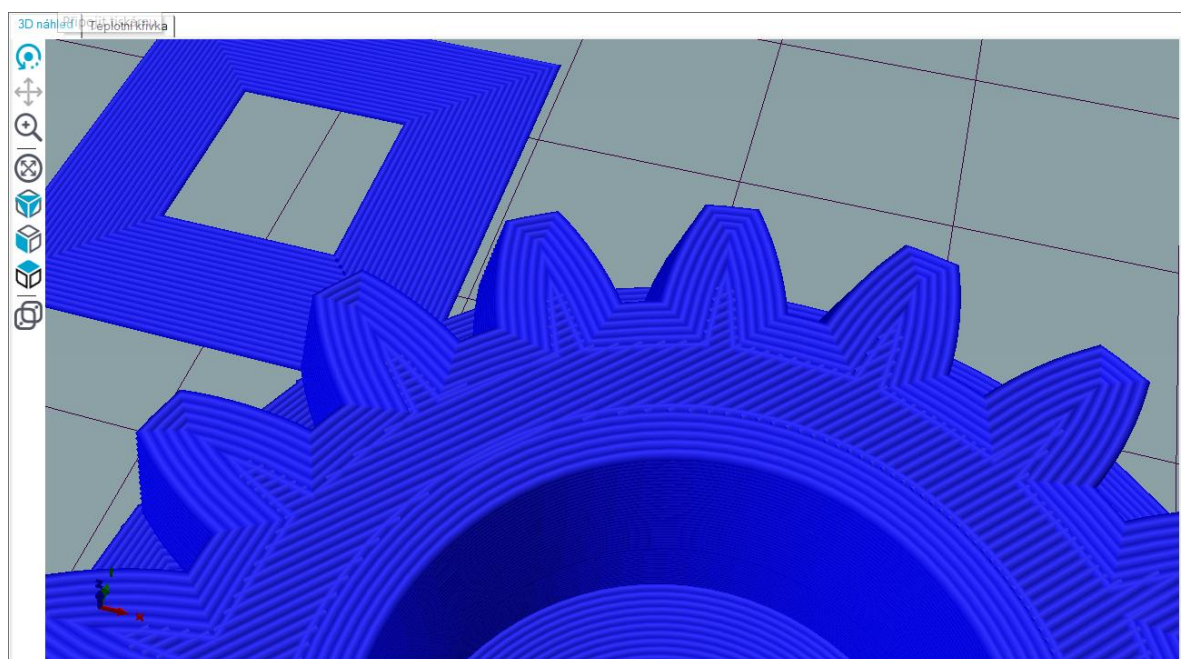
5.7.1. Nylon

Hlavní problém při tisku nylonu byla přilnavost k podložce. Tento problém se podařilo vyřešit na výstavě 3D expo 2019 při konzultaci na stánku Filamentum (tímto děkuji). Jako nejlepší řešení se ukázalo natřít skleněnou podložku vrstvou lepidla Kores a na něj nanést 3D lak. Ten se v hobby prostředí často nahrazuje běžným lakem na vlasy.

Teplota tisku doporučená výrobcem je 210 – 260 °C. Jako ideální se při testovacích výtiscích ukázala teplota 254°C. Při nižších teplotách neměly vrstvy dostatečnou přilnavost, při vyšších naopak ztrácel výtisk přesnost, která je u ozubených kol důležitá.

Dalším důležitým faktorem je u ozubených kol také orientace výtisku. Ta vychází z konstrukce a pro dostatečnou plochu základny musí být osa kol kolmá k podložce. Tato orientace je pro nás nejvýhodnější i z hlediska namáhání, protože největší síly působí rovnoběžně s vrstvami a tedy ve směru, kde má výtisk nejlepší materiálové vlastnosti.

Síla stěny byla zvolena 1,8 mm. S touto hodnotou je zub při modulu 1,75 mm téměř celý tvořen vhodně orientovanými drahami trysky, ale zároveň je ve své patě částečně propojen s výplní (obr. 30).



Obrázek 30.: Tisk ozubených kol

5.7.2. ABS

ABS bylo jedním z prvních materiálů používaných pro 3D tisk. Skleněnou podložku připravíme tak, že ji napřed potřeme tyčinkovým lepidlem Kores, na které nanese štětcem vrstvu tzv. ABS džusu. To je

směs rozpuštěného ABS v acetonu. To zajistí dostatečnou přilnavost i přes značnou teplotní roztažnost materiálu.

Teplota tisku je dle doporučení výrobce 220–240 °C. během testů se nejlépe osvědčila teplota tisku 240 °C a k tomu podložka vyhřívaná na teplotu 90°C. Toto nastavení zajišťovalo dostatečnou přilnavost k podložce, adhezi mezi vrstvami i kvalitu tisku.

Pro co nejvyšší pevnost byla výplň nastavena na 100 %. Počet perimetrů 6. V tomto případě byla tedy tloušťka stěny 1,5mm. Velikost brimu byla 5mm, což zajišťovalo v kombinaci s dalšími parametry dostatečnou přilnavost.

5.8. Dokončovací operace

Po odstranění všech výtisků z podložky bylo nutné odstranit brim u všech výtisků. To bylo provedeno opatrně odlamovacím nožem tak, aby nebyl narušen profil požadovaných výtisků. Po odstranění brimu bylo nutné u některých výtisků zhladit také nerovnosti, hlavně jemně zabrousit otvor v pastorku, aby přesně dosedl na hřídel a nebylo při sestavení nutné používat nepřiměřenou sílu.

5.9. Sestavení

Ještě před samotným sestavením se nalisuje do převodové skříně osa druhého kola. Pro větší pevnost byla díra vymazána epoxidovým lepidlem a následně byla zalisována osa. Do kola 2 se umístí obě ložiska a do 3. kola se vloží klec jehlového ložiska s vnějším kroužkem a zajistí pojistným kroužkem vytištěným z ABS a určeným přesně pro tyto účely.

Při sestavování se musí začít připevněním převodové skříně ke svěrnému kroužku upevněnému na trucku (Obr. 31). Na připravený válec se umístí vnitřní kroužek jehlového ložiska a zajistí pojistným kroužkem. Poté se



Obrázek 31.: Sestavení 1

přípevní k převodové skříni motor (Obr. 34). Je důležité všimnout si orientace drátů vedoucích z motoru pro budoucí připojení k elektronice.



Obrázek 34.: Sestavení 2



Obrázek 33.: Sestavení 3

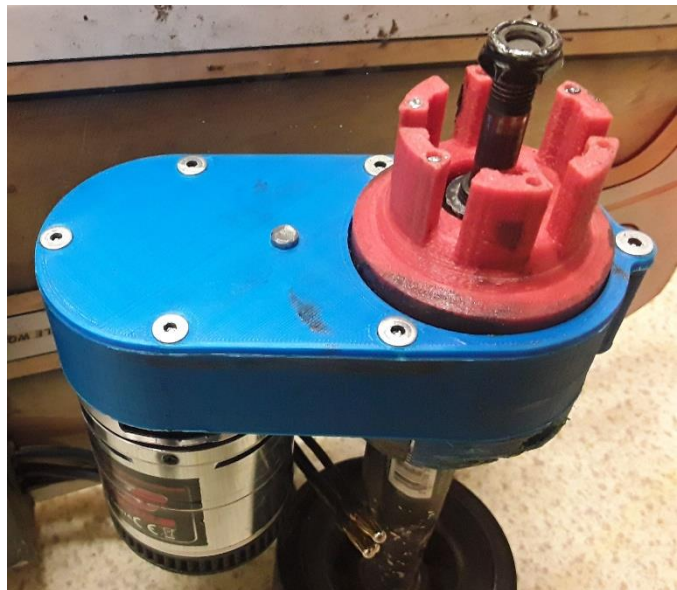


Obrázek 32.: Sestavení 4

Dalším krokem je uložení ozubených kol. Vzhledem k profilu zubů je nutné všechna kola vkládat současně (Obr. 33). Kola se připraví na začátek jednotlivých os a společně se nasunou na svá místa. Je nutné na kola působit rovnoměrnou silou, aby nedošlo k jejich vyosení. To by způsobilo vzpříčení kol na osách a možné poničení jednotlivých součástí.

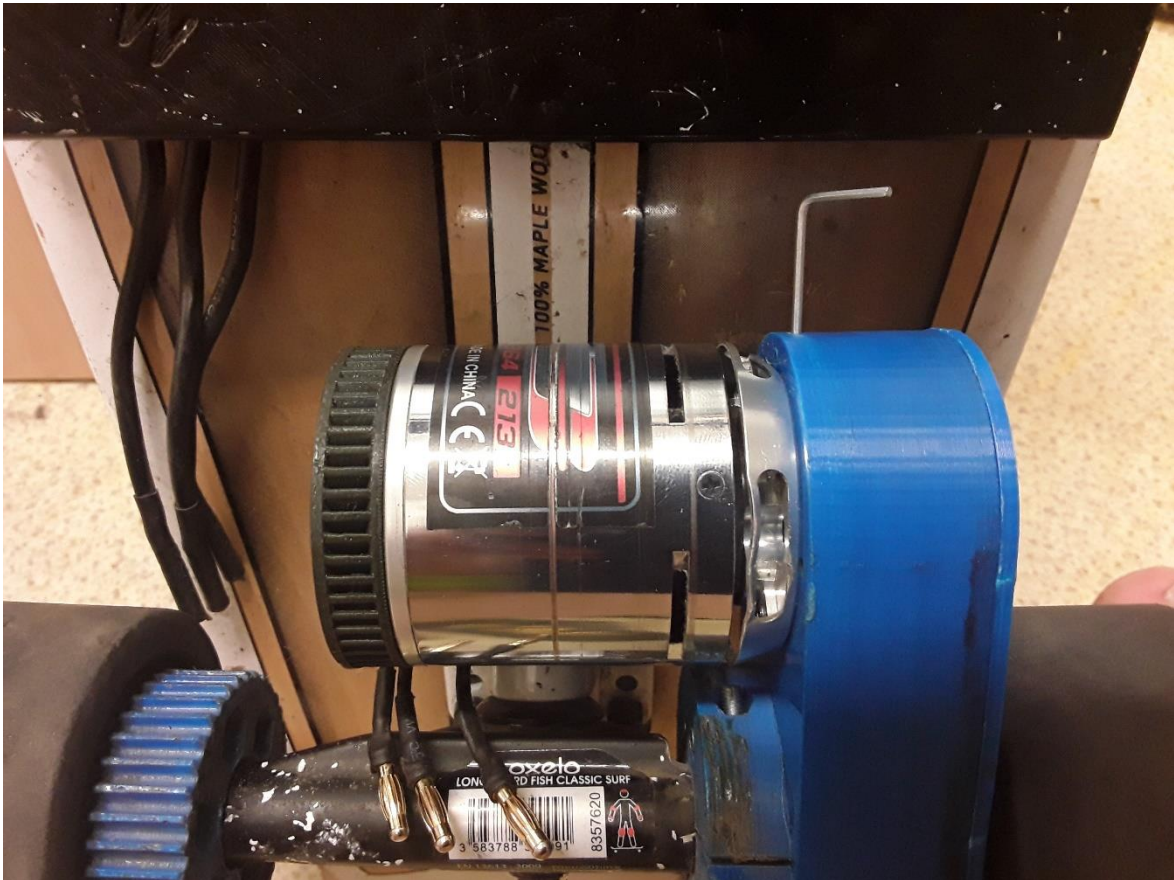
Před uzavřením převodovky kola rovnoměrně pomažeme vazelínou, určenou pro ozubené převody, která snižuje tření a opotřebení kol. Ozubená kola vyrobená z nylonu je možné používat i bez mazání, ale snižuje to jejich životnost a zvyšuje tření a opotřebení [19].

Na závěr se celá převodovka uzavře víkem a namontuje se kolo longboardu, které při správném postupu přesně zapadne na profil kola 3, vystupujícího z převodové skříň. Vzdálenost kola od převodové skříň se upraví pomocí podložek tak, aby byla co nejmenší, ale zároveň kolo v žádném případě nedřelo o skříň.



Obrázek 35.: Sestavení 5

Posledním krokem je utažení pojistných šroubů v pastorku skrz otvor v převodové skříni (Obr. 36).



Obrázek 36.: Sestavení 6

5.10. Záběh

Před plným zatížením je nutné převodovku nejdříve zaběhnout. To bylo provedeno dlouhodobým chodem na prázdno s postupně se zvyšující rychlostí. V průběhu záběhu je možné pozorovat, jak se zpočátku převodovka vlivem odporu a tření zahřívá. Je to způsobeno nepřesnostmi 3D tisku, kdy se můžou na bocích zubů objevit nerovnosti.

V průběhu lze pozorovat, jak tento jev mizí a klesá množství energie potřebné k chodu. To jde softwarově pomocí bluetooth modulu připojeného k řídicí jednotce a mobilní aplikaci. Když se spotřeba energie ustálí, je možné převodovku považovat za zaběhnoutou.

Při otevření převodové skříňe a porovnání zaběhnutých ozubených kol s novými pozorujeme vyhlazení styčných ploch zubů s rovnoměrnou

vrstvou vazelíny po celé ploše. Nyní je převodovka připravena pro plné zatížení.

6. Zhodnocení výrobní metody

Výrobní metoda byla zvolena hlavně s ohledem na dostupnost a cenu. 3D tiskárny se stávají dostupnými pro každého, ať už díky své nízké ceně, dostupnosti ve školách a studentských klubech, nebo díky zakázkovému 3D tisku. Náklady na její provoz a pořízení jsou řádově nižší, než u konvenční výroby i při nutnosti úprav a opakovaných výtisků prototypů.

Během výroby a testů se však objevilo několik nedostatků.

- **Nedostatečná přesnost tisku:** projevovala se hlavně při sestavování, kdy bylo nutné několikrát upravovat velikost otvoru v pastorku, aby správně pasoval na hřídel motoru. Ozubená kola bylo nutné před sestavením silou natlačit do sebe a první otáčky při záběhu provést velmi opatrně, než se srovnaly největší nerovnosti a nepřesnosti. Otvor uvnitř válce pro jehlové ložisko bylo nutné lehce vybrousit a strhnout nerovnosti, které zabraňovaly přesnému nasazení na profil trucku.
- **Mechanické vlastnosti materiálů:** Vzhledem k oceli, nebo dalším materiálům, které se využívají a lze je dále upravovat, kalit a zušlechťovat, má plast horší mechanické vlastnosti, které se stoupající teplotou ještě degradují. To je důvodem problémů s uchycením pastorku na hřídeli motoru, kdy motor v extrémech dosahuje teplot blížících se 100°C, a také nutnosti omezení výkonu. Při použití ocelových ozubených kol by se ani jeden z problémů nevyskytoval.

Cenový rozdíl mezi skříní z ABS vytištěné na 3D tiskárně a zakázkově vyrobenou skříní z hliníku by se pravděpodobně

vyrovnal ceně levnější 3D tiskárny. Plastová skříň se rychleji opotřebovává kamínky odletujícími od vozovky při jízdě, případně otěry o větší nerovnosti. Zatím s ní však nebyl výraznější problém. Víko skříně je ale v místech okolo 3. kola tak tenké, že při nešetrném utažení šroubů dochází k jeho prasknutí.

Naopak pozitivem byla možnost během několika dní vyzkoušet různá řešení a koncepce s nízkými náklady na výrobu. Také proto je 3D tisk nazýván jako rapid prototyping, což lze přeložit jako rychlé prototypování.

Dalším plusem je díky zmiňované dostupnosti to, že si tuto převodovku může vyrobit kdokoliv. Stačí mu k tomu pouze STL soubory jednotlivých dílů, přístup k 3D tiskárně a elementární technické znalosti a dovednosti.

Pokud bychom uvažovali o výrobě většího množství kusů, výhody 3D tisku se postupně snižují. Tisk celé převodovky zabere v závislosti na rychlosti tisku a průměru trysky cca 20 hodin. To je výrazně více než výroba konvenčními postupy. Pro konvenční obrábění by ale bylo vhodné provést nový návrh s menšími rozměry, jiným řešením přenosu kroutícího momentu na kolo longboardu a přímým ozubením.

7. Závěr

Cílem práce byl návrh převodovky pro elektrický longboard a jeho realizace 3D tiskem, konkrétně metodou FDM. Rešerše obsahuje seznámení s elektrickými longboardy a základy 3D tisku.

V praktické části je zahrnuta volba vhodného materiálu pro tisk ozubených kol, návrh ozubených kol, převodové skříně a kompletního pohonu. Jejich kontrolní výpočty a realizace.

Během práce se objevily omezení a nedostatky použité metody shrnuté v předchozí kapitole. Vzhledem k tomu lze říci, že 3D tištěná převodovka není nejvhodnějším řešením pro tuto aplikaci. Při použití dvou motorů, kdy jsou nároky na výkon každého motoru nižší by byla volba plastové převodovky vhodnější.

V práci se povedlo dokázat, že převodovka i ozubená kola vytištěná na 3D tiskárně je realizovatelná a dokáže v tomto konkrétním případě přenést výkon 1kw. Je možné konstatovat, že pro určité aplikace je možné konvenčně vyrobená ozubená kola nahradit plastem.

Použitá literatura

- [1] The Evolution Of Skateboarding - A History From Sidewalk Surfing To Superstardom - Skateboarding Magazine. Skateboarding magazine [online]. United states, 5.3.2013 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <http://www.skateboardingmagazine.com/the-evolution-of-skateboarding-a-history-from-sidewalk-surfing-to-superstardom/>
- [2] JACKSON, Sammy. Longboard Vs Skateboard: Defining Differences. *Best Longboards | Longboard Reviews 2019* [online]. New York, 18.2.2019 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://longboardbrand.com/longboard-vs-skateboard/>
- [3] The History of the Electric Skateboard. Magnetboards blog [online]. Carlsbad, USA, 24.1.2016 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://blog.magnetboards.com/the-history-of-the-electric-skateboard/>
- [4] Longboard - Wiki - All about longboarding | skatedeluxe Blog. Skatedeluxe Blog - Skateboard News & Product Reviews [online]. Schimberg, Germany [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://www.skatedeluxe.com/blog/en/wiki/longboarding/longboard-wiki/>
- [5] Longboard Wheels - MuirSkate.com. MuirSkate.com - The Longboard Shop Where We Ride What We Sell - MuirSkate.com [online]. San Diego, USA [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://www.muirskate.com/longboard/wheels/all>
- [6] Most used Motors for Quadcopter. Quads for Fun [online]. Brazil, 2014 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://quadsforfun.wixsite.com/quadsforfun/basics-about-quadcopters---page-03>
- [7] Elektro, odborný časopis pro elektrotechniku [online]. Praha, 2011, 2011(10) [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [8] How To Choose A Motor for DIY Electric Skateboards. MBoards - DIY Electric Skateboard Parts - Build an Electric Skateboard [online]. Las Vegas, 15.1.2019 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://www.mboards.co/blogs/news-and-how-tos/how-to-choose-a-motor>
- [9] LIM, Paxson. Let ´s Talk About Drive Trains - Belts, Hubs, Gears, Oh My!. Electric Skateboard HQ [online]. 4.9.2018 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://www.electricskateboardhq.com/lets-talk-about-drive-trains-belts-hubs-gears-oh-my/>
- [10] A beginner guide to build your own electric skateboard. Electric boards solutions [online]. 20.2.2018 [cit. 2019-07-24]. Dostupné

- z: <https://electricboardsolutions.com/blogs/building-an-esk8/diy-esk8>
- [11] TORQUEBOARDS DIRECT DRIVE MOTOR KIT. DIY Electric Skateboard Kit; Parts - Build A DIY Electric Skateboard [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://diyelectricskateboard.com/products/torqueboards-direct-drive-motor-kit>
- [12] Rozdíly mezi bateriemi typu Li-Ion a Li-Pol. ZTE :: Recenze mobilů z číny - Servis a opravy čínských značek po záruce [online]. 2013 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <http://www.smart-mobil.eu/clanky/44-rozdily-mezi-bateriemi-typu-li-ion-a-li-pol/>
- [13] STŘÍTESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Praha: Prusa Research, 2019.
- [14] LIPSON, Hod a Melba KURMAN. Fabricated: the new world of 3D printing ; [the promise and peril of a machine that can make (almost) anything]. Indianapolis: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-35063-8.
- [15] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [16] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. Technický průvodce. ISBN 80-03-00426-8.
- [17] DIY Eboard [online]. 2019 [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://diy-eboard.com/>
- [18] Mechanické převody. ELEKTRONICKÁ UČEBNICE [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1900>
- [19] KOLOUCH, Jan. Strojní součásti z plastů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [20] SKF - Tabulková část. SKF.com [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/product-tables/index.html>
- [21] KUGL, Otmar. Projekt - 3. ročník. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01638-2.
- [22] Geeetech Unassembled Prusa I3 pro C dual extruder 3D printer. Geeetech 3d printers onlinestore [online]. Shenzhen (China), 2019 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.geeetech.com/geeetech-unassembled-prusa-i3-pro-c-dual-extruder-3d-printer-diy-p-927.html>
- [23] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.

Seznam obrázků

Obrázek 1.: První skateboardy [1]	2
Obrázek 2.: Skateboard vs longboard [2]	2
Obrázek 3.: První motorizované skateboardy [3]	3
Obrázek 4.: díly skateboardu/longboardu [2]	4
Obrázek 5.: Typy longboardových desek [4].....	5
Obrázek 6.: Součásti a geometrie trucku [4]	5
Obrázek 7.: Tvary bushingů. 1- kužel, 3- válec [4]	6
Obrázek 8.: ABEC 11 Flywheels [5]	6
Obrázek 9.: Orangatang Caguama [5].....	6
Obrázek 10.: BLDC motor [6]	7
Obrázek 11.: Průběh napětí na jednotlivých vinutích[7]	8
Obrázek 12.: Hub motor [10].....	8
Obrázek 13.: Řemenový pohon	9
Obrázek 14.: Direct drive systém [11]	9
Obrázek 15.: Schéma zapojení [10]	10
Obrázek 16.: FDM tisk [12]	11
Obrázek 17.: Schéma převodovky	13
Obrázek 18.: Prostor pro převodovku	13
Obrázek 19.: Gembird nylon.....	17
Obrázek 20.: Řez sestavou	23
Obrázek 21.: Ozubené kolo s vložkou.....	23
Obrázek 22.: Spojení plastových pastorků a hřídelí [19]	23
Obrázek 23.: Kolo 2.....	24
Obrázek 24.: Uložení kola 3	25
Obrázek 25.: Parametry ložiska SKF 626 [20]	27
Obrázek 26.: Parametry ložiska SKF NKI 22/16 [20]	27
Obrázek 27.: Převodová skříň.....	29
Obrázek 28.: Řez sestavou	30
Obrázek 29.: Geetech Prusa I3 Pro C [20].....	31
Obrázek 30.: Tisk ozubených kol	32
Obrázek 31.: Sestavení 1	33
Obrázek 32.: Sestavení 4	34
Obrázek 33.: Sestavení 3	34
Obrázek 34.: Sestavení 2	34
Obrázek 35.: Sestavení 5	34
Obrázek 36.: Sestavení 6	35



Seznam tabulek

Tabulka 1.: Důležité vlastnosti materiálů	18
Tabulka 2.: Vlastnosti PA 66	18
Tabulka 3.: Návrh ozubených kol.....	20
Tabulka 4.: Parametry tisku	31

Seznam příloh

- 1) Výstup programu Inventor – soukolí pastorek, kolo2
- 2) Výstup programu Inventor – soukolí 2,3
- 3) Výkres sestavy
- 4) Kusovník sestavy
- 5) Výrobní výkres pastorku
- 6) Výrobní výkres převodové skříně