

Vysoká škola technická a ekonomická

v Českých Budějovicích

Seminární práce

Jan Večerek

2019

Vysoká škola technická a ekonomická

Seminární práce pro předmět Části a mechanismy strojů II.

Převodovaná přední ramena pro Trikoptéru Elektra 250

Autor seminární práce: Jan Večerek

Vedoucí seminární práce: doc. Ing. Petr Hrubý, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto seminární práci vypracoval/a samostatně pouze s použitím uvedených zdrojů.

V Českých Budějovicích



J. Kurek

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Cíl práce.....	7
3	Teoreticko-metodologická část.....	8
3.1	Literární rešerše.....	8
3.2	Použitý filament.....	8
3.2.1	PLA (polylactic acid – kyselina polymléčná).....	8
3.2.2	Nylon (PA- Polyamid).....	9
3.2.3	NYLON PAJET 1,75MM NATURAL 0,5 KG FILAMENT PM.....	10
3.3	Servo HS-45HB.....	11
3.4	Ložisko MR 85 EZO.....	13
3.5	Úvod do problému.....	14
3.6	Ozubené převody.....	14
3.6.1	Tvar boku zubu.....	15
3.6.2	Geometrie zubů.....	15
3.6.3	Čelní ozubení / převody s rovnoběžnými osami ozubených kol.....	16
3.6.4	Čelní ozubení se šikmými zuby.....	16
3.7	Ložiska:.....	19
3.7.1	Radiální jednořadé kulové ložisko.....	19
3.8	Výzkumný problém.....	20
3.9	Výpočty:.....	21
3.10	Metodika práce.....	23
4	Aplikační část a diskuse výsledků.....	24
4.1	Aplikační část.....	24
4.1.1	Výroba základny dronu Trikoptéra 250.....	24

4.1.2	Modelování a výpočet ozubých kol	24
4.1.3	Výpočet osové vzdálenosti dvou středních kol.....	28
4.1.4	Vložení ozubených kol do základny	28
4.1.5	Konečná fáze s elektronikou.....	30
4.2	Diskuse výsledků	31
4.3	Návrhy opatření.....	33
5	Závěr.....	34
	Seznam zdrojů.....	35
	Seznam použitých zkratk	37
	Seznam tabulek popř. obrázků.....	39

1 Úvod

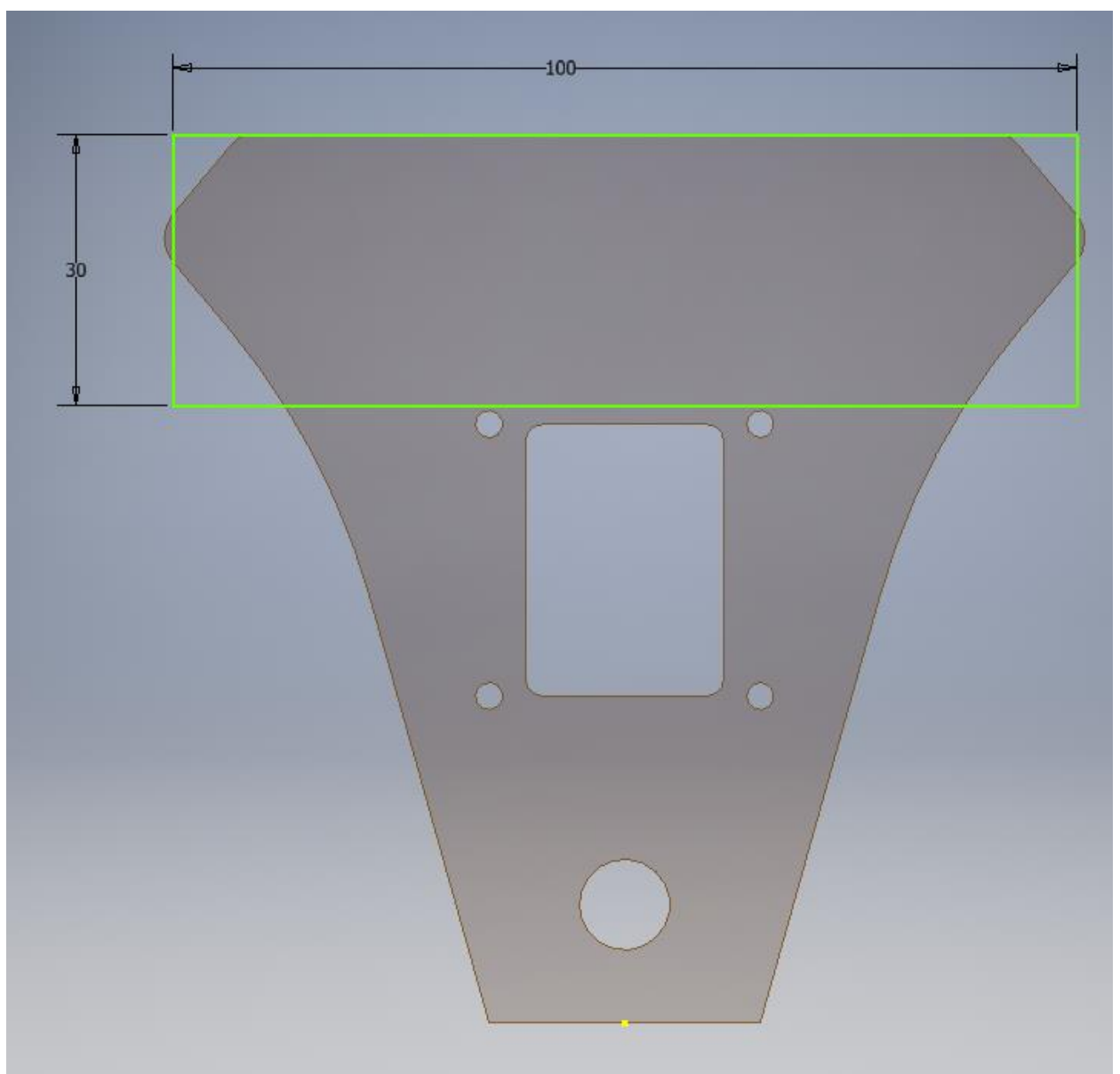
V seminární práci je popsán návrh a konstrukce převodu mezi dvěma pohyblivými předními rameny Trikopty a servopohonem ukrytým v trupu dronu.

Práce zahrnuje teoretickou i aplikační část, výpočty a screeny 3D modelů tvořených v Autodesk Inventoru Professional 2018. Celý projekt bude vytištěn na 3D tiskárně. Ozubená kola budou tištěna z nylonového filamentu, zbytek pak z materiálu PLA.

Zadání bylo vybráno z důvodu osobního zájmu o vytvoření efektivní mechanické převodovky vyklápějící a zaklápějící ramena dronu k trupu pomocí jednoho serva.

2 Cíl práce

Cílem seminární práce je vytvořit funkční převod mezi dvěma pohyblivými předními rameny Trikoptyéry a servopohonem ukrytým v trupu dronu. Měnný úhel ramen od trupu by se měl pohybovat od 0° do 120° . K dosažení tohoto efektu využijeme 4 ozubených kol, servopohonu a tří ložisek. Pracovní prostor, do kterého by se převodovka měla vejít, je $100 \times 30 \times 10 \text{ mm}$. Systém převodů nám po vysunutí do požadovaného úhlu má zajistit fixaci ramen.



Obr. 1. Vyznačený pracovní prostor na základně (VLASTNÍ, 2019)

3 Teoreticko-metodologická část

3.1 Literární rešerše

K danému tématu nám bylo poskytnuto v Informačním systému v sekci učební materiály velké množství odborné literatury i materiálů z kterého máme možnost čerpat.

Projekt „Trikoptéra Elektra 250“ je založen převážně na výrobě komponentů z 3D tištěných materiálů. Informace jsem čerpal ze stránek Creative mechanism, materiálpro 3D a blog.vyoralek. Dále také z Průša stránek a materiálpro 3D.

K výpočtu a problematice návrhu převodovky byly dobrým zdrojem informací stránky Mlgeardesigns, E-konstrukér a moodle. Asi nejcennějším zdrojem se stal Eluc.

3.2 Použitý filament

3.2.1 PLA (polylactic acid – kyselina polymléčná)

Polylaktická kyselina (PLA) je odlišná od většiny termoplastických polymerů v tom, že je odvozena z obnovitelných zdrojů, jako je kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Naproti tomu většina plastů pochází z destilace a polymerace neobnovitelných zásob ropy. Plasty, které jsou odvozeny z biomasy (např. PLA), jsou známé jako „bioplasty“.

Polylaktická kyselina je biologicky rozložitelná a má vlastnosti podobné polypropylenu (PP), polyethylen (PE) nebo polystyrenu (PS). Může být vyrobena z již existujících výrobních zařízení (těch, která byla navržena a původně používána pro plasty petrochemického průmyslu). Díky tomu je výroba relativně nákladově efektivní. V souladu s tím má PLA druhý největší objem výroby jakéhokoliv bioplastu (nejběžnější je typicky uváděn jako termoplastický škrob). (CREATIVE MECHANISM, 2015)

PLA	
Hustota (kg/m ³)	1250
Teplota extrudéru (°C)	150 - 210
Teplota trysky (°C)	180 - 230
Teplota podložky (°C)	20 - 60
Tisková podložka	Nepovinná
Komora při tisku	Nepovinná
Přilnutí první vrstvy	Dobré
Výpary	Skoro žádné
Absorbce vlhkosti	Ano
Youngův modul (GPa)	3,5

Modul pružnosti (GPa)	4
Pevnost v ohybu (MPa)	80
Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)	40
Pevnost v tahu (MPa)	110
Odolnost proti nárazu (J/m)	Ne
Tvrdość Rockwell R	-
Teplota skelného přechodu (°C)	60
Deformace při teplotě (°C)	65
Teplota tání (°C)	160
Tepelná kapacita (J/kg*K)	1800
Tepelná vodivost (W/m*K)	0,13
Tepelná difuzivita (m ² /s)	0,058

Tab: 1. Vlastnosti materiálu PLA pro 3D tisk (MATERIÁLPRO 3D A BLOG.VYORALEK, 2017)



Obr. 2. PLA filament (PRUSA , 2019)

3.2.2 Nylon (PA- Polyamid)

Polyamid (PA) má vysokou pevnost a odolnost proti otěru, je chemicky odolný a dobře absorbuje vibrace. Má vynikající zpracovatelnost, dá se snadno řezat, ohýbat, frézovat a vrtat. Vyrábí se v různých modifikacích – nejběžnější je PA 6. Dalšími typy jsou PA 6.6, PA 11, PA 12, které mohou mít ještě různá plniva pro vylepšení zejména kluzných vlastností. Snáší provozní teploty od -40 do $+100$ °C. Materiál je dostupný standardně v přírodní (mléčné) barvě, některé typy i v černé. Polyamid má široké využití, vyrábí se z něj trubková a kluzná ložiska, podložky, válce pro dopravníky, ozubená kola, řetězová kola, těsnicí kroužky, izolátory apod. Je dostupný jak v deskách, tak i v plných a dutých tyčích (na poptávku). (Vink, 2019)

Je flexibilní v tenkých vrstvách, ale s velmi vysokou adhezí (přilnutí) mezi vrstvami. Jeho nízký součinitel tření a vysoká teplota tání je vynikající volbou pro tisk funkčních a technických dílů. Je velmi hygroskopický, to znamená, že rychle absorbuje vodu ze vzduchu. Aby tisk s nylonem byl úspěšný, musí být vlákno suché. Pokud suché není, vzniknou na materiálu bublinky. Suché nylonové vlákno tiskne hladké předměty s lesklým povrchem.

hustota: 1100 kg/m³, množství vlákna na 1kg cívce: 909 cm³

teplota extrudéru: 235 – 260 °C, **teplota podložky:** 100 – 130 °C

Varianty Nylonu:

Nylon 618 - je nejpopulárnější. Má přirozenou bílou barvu.

Nylon 645, který je dostatečně jasný, ale je velmi obtížné s ním pracovat.

Nylon FX256 je mnohem méně křehký a tudíž pevnější než ABS a PLA.

Nylon PA6 Polymer (polyamid 6), což je velmi odolný materiál a používá se k tisku extrémně robustní a těžkých nákladních dílů. Vlákna z nylonu PA6 jsou těžké, mají vysokou pevnost v tahu, lesk a pružnost. Tento materiál je široce používán automobilky díky své velké trvanlivosti. (MATERIÁLPRO 3D, 2017)

3.2.3 NYLON PAJET 1,75MM NATURAL 0,5 KG FILAMENT PM



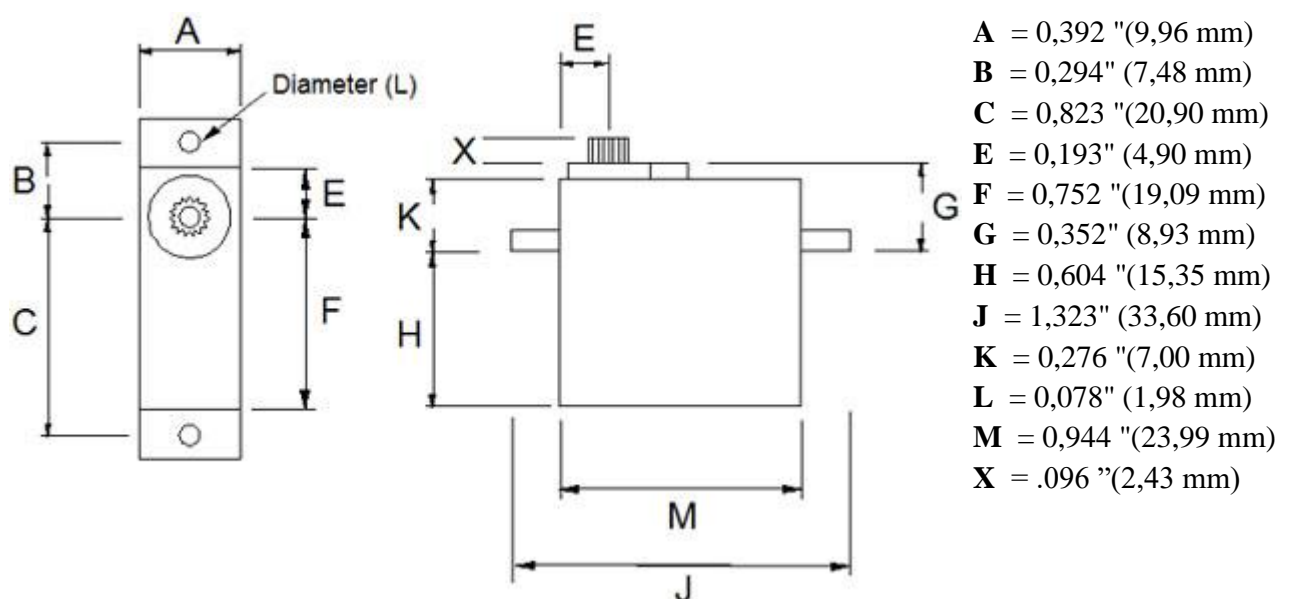
Obr. 3. Nylon PAJet (MATERIÁLPRO 3D, 2017)

Termoplast vhodný pro technické a mechanicky namáhané díly s tiskovými parametry obdobnými jako ABS:

- teplota HE 235 °C
- teplota HB 110°C
- rychlost tisku 40 mm/s
- bezprůvanové temperované prostředí
- tisk bez ofuku objektu
- tisková podložka kapton, silnější Ultem nebo obyčejný kancelářský papír přilepený lepidlem na vyhřívaném skle.

PAJet je složený z amidických skupin o určitém počtu v makromolekule. Tento počet skupin při polymeraci dává PAJetu vlastnosti vhodné pro tisk náročnějšího inženýrského plastu i na stolních tiskárnách. Vlastnosti tohoto tiskového média jsou specifické oproti běžným materiálům, a to vyšší tepelná odolnost do 160°C, vyšší rázová houževnatost a vysoká odolnost vůči oděru. Díky vysoké odolnosti proti oděru a vysoké rázové houževnatosti je PAJet využíván pro tisk kluzně namáhaných ložisek, spojů, distančních prvků a čepů. (MATERIÁLPRO 3D, 2019)

3.3 Servo HS-45HB

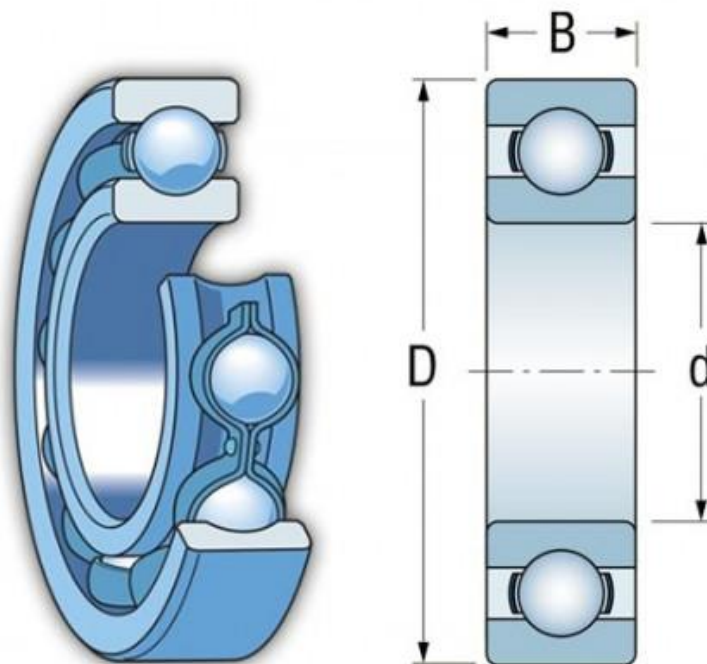


Obr. 4. Servo HS-45HB (SERVOCITY, 2019)

Cena výrobku	350 Kč
Hmotnost produktu	0,28oz (8g)
Styl výstupního hřídele	15 zubů (Al) spline
Rozsah napětí	4.8V - 6.0V
Rychlost bez zatížení (4,8 V)	0,14 s / 60 °
Rychlost bez zatížení (6,0V)	0,12 s / 60 °
Stohový moment (4.8V)	13,88 oz / in.
Stojanový moment (6.0V)	17 oz / in.
Max. Rozsah signálu PWM (standardní)	790-2405 μsec
Cestování za μs	.118 ° / μsec
Max. Cestování	191 ° C
Amplituda impulsu	3-5V
Provozní teplota	-20 ° C až + 60 ° C
Odtok proudu - volnoběh (4.8V)	8mA
Odtok proudu - bez zátěže (4.8V)	100mA
Modifikovatelné kontinuální rotace	Ne
Směr w / Zvýšení PWM signálu	Ve směru hodinových ručiček
Šířka mrtvého pásma	8μs
Typ motoru	3 Pole Ferrit
Pohon potenciometru	Přímý pohon
Styl zpětné vazby	5kΩ Potenciometr
Podpěra výstupního hřídele	Horní kuličkové ložisko
Typ převodovky	Přímý řez
Materiál převodovky	Karbonit
Délka drátu	6,29 "(160 mm)
Drátoměr	28AWG

Tab: 2. Parametry serva HS-45HB (SERVOCITY, 2019)

3.4 Ložisko MR 85 EZO



Obr. 5. Ložisko MR 85 EZO (PRUMEX, 2019)

Výrobce: EZO

Katalogové číslo: L.MR85 EZO

Cena výrobku: 88-106 Kč

EZO ložisko MR85 - nerozebíratelné jednořadé radiální kuličkové ložisko s ocelovou klecí a s normální radiální vřutí. Klec ložiska MR 85 je vedena kuličkami.

Parametry:

Klec	ocelová	Šířka B (mm)	2
Materiál	ocel	Typ	Ložiska kuličková
Profil díry	válcová	Vřutí	normální
Průměr d (mm)	5	Značka výrobce	EZO
Průměr D (mm)	8		

(PRUMEX, 2019)

3.5 Úvod do problému

Převod mezi předními rameny a servopohonem tvoří jednu ze základních mechanických částí dronu. Budou na ni kladeny nemalé podmínky z hlediska odolnosti materiálu i konstrukce. Budeme muset předpokládat namáhání v zubech a utvořit převody tak, aby nevznikaly vůle a aby bylo dosaženo požadované fixace/aretace v režimu letu. Musíme hledět i na hmotnost převodovky. Ta je velice důležitá zejména pro dosažení co nejmenší letové váhy dronu. V projektu je plno věcí, které by bylo zajímavé navrhnout, propočítat, vyřešit a případně vylepšovat.

3.6 Ozubené převody

Jsou to nejčastěji používané mechanické převody. Ozubená kola přenášejí točivé a krouticí momenty bezprostředně z jedné hřídele na druhý. Přenos sil lze řešit tvarovým stykem nebo bez prokluzu. Dvojicí ozubených kol lze dosáhnout požadovaného převodu, změnou krouticího momentu, počtu otáček, smysl otáčení. (MOODLE, 2015)

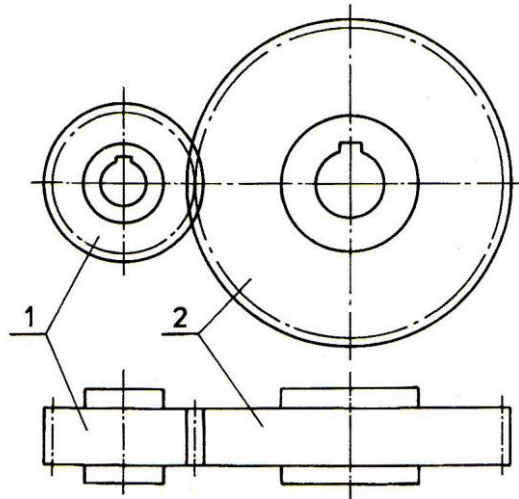
Převodový poměr je u převodů ozubenými koly stálý – neměnný. Nevýhodami ozubených převodů jsou velká hlučnost, netlumení rázů, konstrukční a výrobní složitost a jsou vhodné jen pro malé osové vzdálenosti hřídelů.

Základní ozubený převod se skládá ze dvou ozubených kol:

- **hnacího ozubeného kola,**
- **hnaného ozubeného kola.**

Menší ozubené kolo nazýváme **pastorek (1)**, větší nazýváme **ozubené kolo (2)**.

(ELUC, 2018)



Obr. 6. Pastorek a ozubené kolo (ELUC, 2018)

3.6.1 Tvar boku zubu

Evolventní bok zubu je malou částí evolventy. Vzniká odvalováním bodu tvořící přímky po základní kružnici.

Evolventní ozubení je necitlivé na malé změny vzdálenosti os hřídelů.

Výhody: snadná a silná pata zubu

Cykloidní tvar boku zubu je malou částí cykloidy.

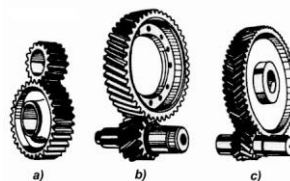
Cykloida vzniká odvalováním bodu tvořící kružnice po základní kružnici (méně časté použití)

(MOODLE, 2015)

3.6.2 Geometrie zubů

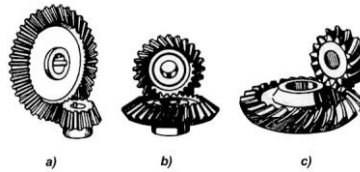
Převody ozubenými koly rozdělujeme podle vzájemné polohy os spolu zabírajících kol:

- **převody s rovnoběžnými osami,**



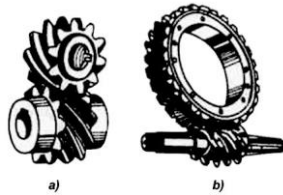
Obr. 7. Převody s rovnoběžnými osami (ELUC, 2018)

- **převody s různoběžnými osami,**



Obr. 8. Převody s různoběžnými osami (ELUC, 2018)

- převody s mimoběžnými osami.



Obr. 9. Převody s mimoběžnými osami (ELUC, 2018)

3.6.3 Čelní ozubení / převody s rovnoběžnými osami ozubených kol

Jsou to čelní soukolí s vnějším nebo vnitřním ozubením a mohou mít zuby uspořádané jako:

- přímé,
- šikmé,
- šípové.

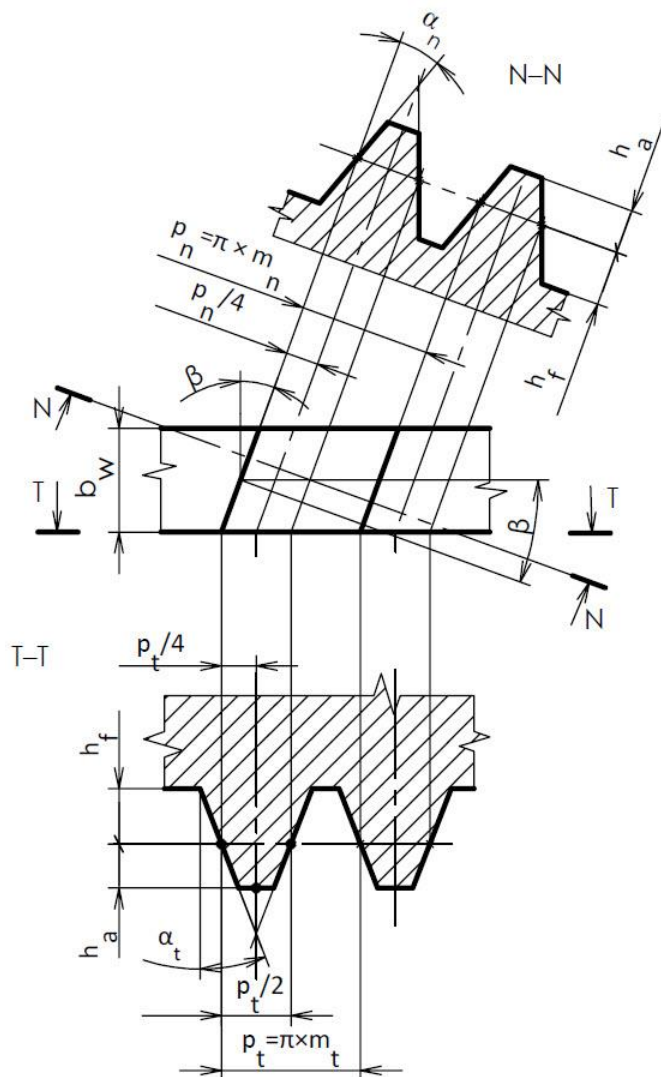
Vnitřní ozubení se používá tam, kde potřebujeme co nejmenší osovou vzdálenost.

(ELUC, 2018)

3.6.4 Čelní ozubení se šikmými zuby

U kol se šikmými zuby rozeznáváme:

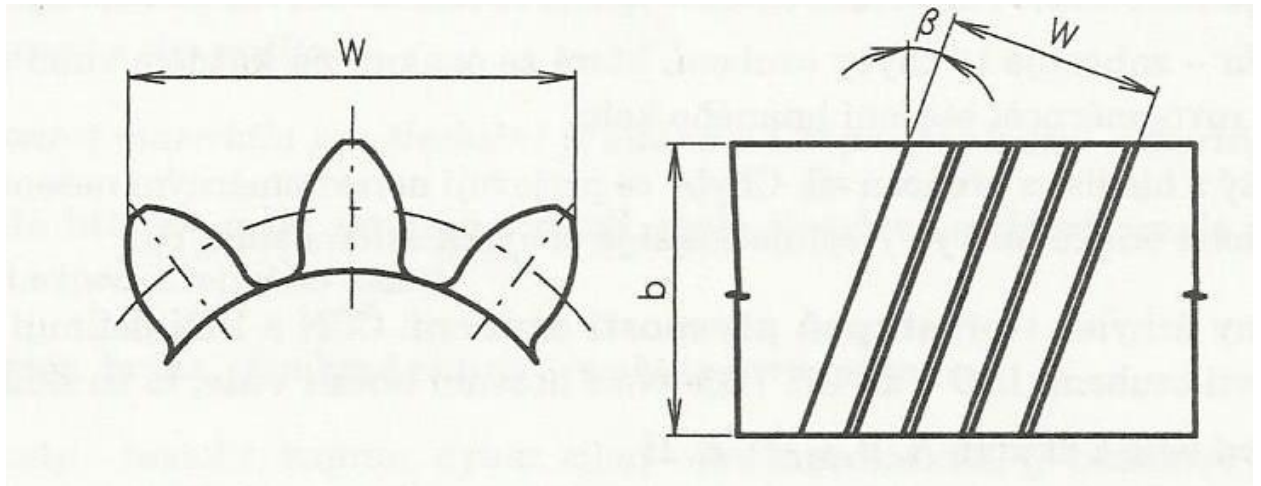
- **normálový profil zubů** – profil zubů v normálové rovině N–N kolmé na boční přímku zubů; je totožný s normalizovaným základním profilem (index **n**),
- **čelní profil zubů** – profil zubů v čelní rovině T–T (index **t**).



Obr. 10. Převody s mimoběžnými osami (MLGEARDESIGNS, 2013)

Ozubená kola jsou velmi přesné součásti zhotovované na speciálním stroji za použití speciálního nářadí. Základní veličinou ozubeného kola je modul.

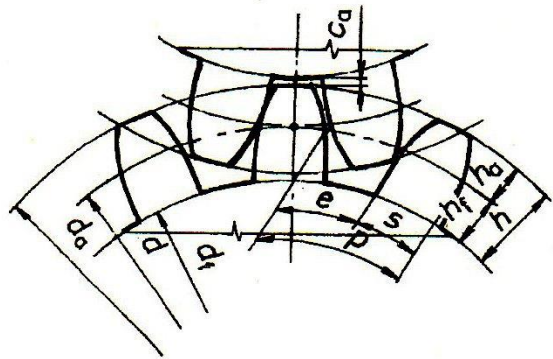
Modul je část průměru roztečné kružnice připadající na jeden zub. Spolu zabírající kola musí mít stejný modul. Velikost modulu je normalizována a všechny ostatní rozměry ozubeného kola jsou od něj odvozeny. (MLGEARDESIGNS, 2013)



Obr. 11. Rozměry soukolí (MLGEARDESIGNS, 2013)

U ozubeného kola rozeznáváme tyto hlavní pojmy:

- průměr hlavové kružnice d_a ,
- průměr roztečné kružnice d ,
- průměr patní kružnice d_f ,
- mezi hlavovou a patní kružnicí je výška zubu h ,
- výška zubu je roztečnou kružnicí rozdělena na výšku hlavy zubu h_a a výšku paty zubu h_f
- mezi jednotlivými zuby je zubní mezera e ,
- tloušťka zubu s i velikost zubní mezery se měří na roztečné kružnici,
- rozteč zubů P je vzdálenost os dvou sousedních zubů na roztečné kružnici, protože osy nelze měřit, můžeme rozteč definovat i jako vzdálenost bodů roztečné kružnice na stejném boku dvou zubů.
- hlavová vůle c_a je vzdálenost mezi výškou hlavy a výškou paty spolu zabírajících kol.



(MUJSOLIDWORKS, 2017)

3.7 Ložiska:

Ložiska se používají ke snížení tření. Při kontaktu kovu s kovem dochází k velkému tření. Třením se zvyšuje opotřebení kovu, protože dochází k jeho pomalému obrušování. Ložiska omezují tření tím, že umožňují, aby se oba povrchy vzájemně odvalovaly, čímž se snižuje míra vznikajícího tření.

Skládají se z hladkých kovových kuliček nebo válečků, které se valí po hladkém vnitřním a vnějším kovovém povrchu. Válečky nebo kuličky přebírají zatížení, a tím umožňují, aby se zařízení otáčelo.

Zatížení působící na ložisko je buď radiální, nebo axiální. V závislosti na svém umístění v mechanismu může být ložisko vystaveno jen radiálním nebo axiálnímu zatížení nebo kombinaci obou. Například ložisko v kole vašeho auta zachycuje jak radiální, tak axiální zatížení. Hmotnost auta působící na ložisko vytváří radiální zatížení, zatímco axiální zatížení vzniká, když auto zatáčí.

Rozdělení:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| - Kuličkové ložisko | - Axiální kolové ložisko |
| - Kuličkové ložisko jednořadé | - Axiální kuličkové ložisko |
| - Kuličkové s kosoúhlým stykem | - Axiální válečková ložiska |
| - Kuličkové dvouřadé naklápečí | - Axiální soudečková ložiska |
| - Válečkové ložisko | - Příčně dělená ložiska |
| - Kuželíkové ložisko | - Ložiska pro železniční aplikace |
| - Soudečkové ložisko | - Speciální valivá ložiska |
| - Jehlové ložisko | |

(E-KONSTRUKTER A ZKL, 2015)

3.7.1 Radiální jednořadé kulové ložisko

Kuličková ložiska jsou nejběžnějším typem ložisek a mohou zvládat jak radiální, tak axiální zatížení. Kuličková ložiska se také označují jako jednořadá ložiska s hlubokou drážkou neboli

Conradova ložiska. Vnitřní kroužek je obvykle připevněn na otočnou hřídel a drážka na jeho vnějším průměru slouží jako kruhová oběžná dráha pro kuličky. Vnější kroužek je upevněn do ložiskového pouzdra. Kulové valivé elementy jsou umístěny v kroužku s oběžnou dráhou a působící zatížení se přenáší z vnějšího kroužku na kuličku a z kuličky na vnitřní kroužek. Drážky oběžných drah mají obvykle poloměry zakřivení odpovídající 51,5 % až 53 % průměru kuličky. U oběžných drah s menším poloměrem zakřivení může velmi podobný tvar kuliček a drah vyvolávat velké valivé tření. U oběžných drah s větším poloměrem zakřivení se může zkracovat únavová životnost z důvodu zvýšeného namáhání v menší styčné ploše mezi kuličkou a kroužkem.



Obr. 12. Kuličkové ložisko (E-KONSTRUKTER, 2015)

Místo dotyku mezi kuličkou a vnějším kroužkem s oběžnou dráhou je kvůli kulovému tvaru valivého elementu velmi malé. To také napomáhá velmi hladkému otáčení kuličky. Vzhledem k tomu, že je místo dotyku tak malé, může dojít v určitém místě k přetížení valivého elementu, které způsobí deformaci kuličkového ložiska. Tím se ložisko zničí. Kuličková ložiska se obvykle používají v aplikacích s relativně malým zatížením. (E-KONSTRUKTER, 2015)

3.8 Výzkumný problém

Známé či zadané parametry:

- Osová vzdálenost mezi největšími vnějšími ozubenými koly je 60 mm.
- Servo výstup 140°
- Pracovní úhel ramen 0-120°
- Použité ozubení: přímé ozubení se šikmými zuby
- Šířka ozubeného kola 4 mm
- Použitý materiál Nylon
- Radiální ložiska: 3x kuličkové jednořadé
- Úhel sklonu zubů $\beta = 40^\circ$
- Úhel záběru $\alpha = \alpha_n = 20^\circ$
- Smysl stoupání boční křivky zubu – levý,

3.9 Výpočty:

Při výpočtu rozměrů šikmých zubů vycházíme ze dvou geometrických rovin – čelní (T) a normálové (N). Obě roviny mají svůj vlastní modul. Vzájemný vztah mezi moduly je:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

Obdobně i mezi roztečemi zubů v obou rovinách platí:

$$t_t = \frac{t_n}{\cos \beta}$$

V normálové rovině má ozubení svůj základní tvar. Odvozujeme v ní rozměry zubů:

$$m_n = m$$

výška hlavy zubu

$$h_a = m_n$$

výška paty zubu

$$h_f = 1.25 \cdot m_n$$

normálová rozteč

$$t_n = \pi \cdot m_n$$

normálová tloušťka zubu (na roztečné kružnici)

$$s_n = \frac{t_n}{2}$$

V tečné rovině odvozujeme rozměry celého kola:

roztečná kružnice

$$D = z \cdot m_t = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta}$$

výška hlavy zubu

$$D_a = D + 2 \cdot h_a = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta} + 2 \cdot m_n$$

patní kružnice

$$D_f = D - 2 \cdot h_f = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta} - 2,5 \cdot m_n$$

základní kružnice

$$D_b = D \cdot \cos \alpha$$

Pro vzdálenost os v soukolí se šikmým ozubením pak platí:

$$A = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot \frac{m_n}{\cos \beta}$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že osová vzdálenost soukolí závisí na uhlu sklonu β .

Je-li třeba šikmé ozubení korigovat, provádí se korekce v normálové rovině:

výška hlavy zubu

$$h_a = m_n + x \cdot m_n$$

výška paty zubu

$$h_f = 1,25 \cdot m_n - x \cdot m_n$$

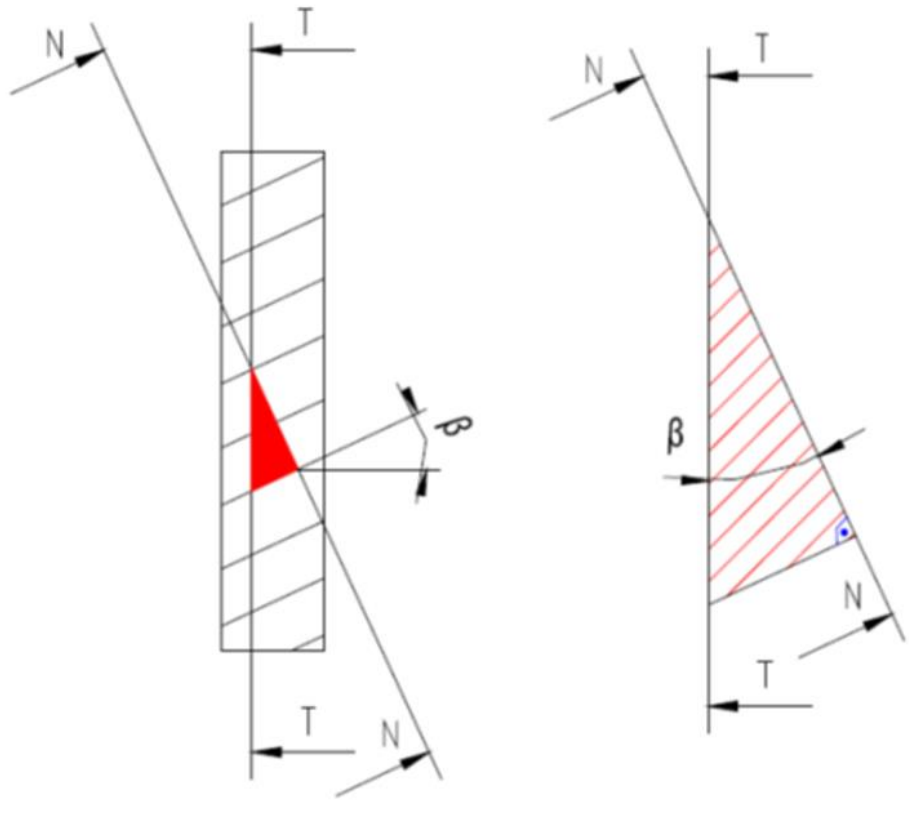
čelní úhel záběru ... $\alpha_t = \arctg(\tg \alpha_n / \cos \beta)$

stoupání šroubovice ... $L = (\pi \times D) / \tg \beta$

čelní tloušťka zubu ... $s_t = t_t / 2$

šířka ozubení ... $b = \psi_m \times m_n$

(E-KONSTRUKTER, 2015)



Obr. 13. Sklon zubu (SLIDEPLAYER, 2017)

(MUJSOLIDWORKS A SLIDEPLAYER, 2017)

3.10 Metodika práce

Postup naší práce byl následovný:

1. Vymodelování základny Trikoptyéry Elektra 250 pro uchycení ozubených kol a vymezení pracovního prostoru.
2. Návrh a výpočet ozubených kol pomocí vzorců, tabulek a programu Adobe Invertor Professional 2018.
3. Výběr vhodného 3D tištěného materiálu pro náš převod.
4. Vymodelování a navazování modelu i převodovky.
5. Tisk dílů na 3D tiskárně Original Průša I3 MK3S

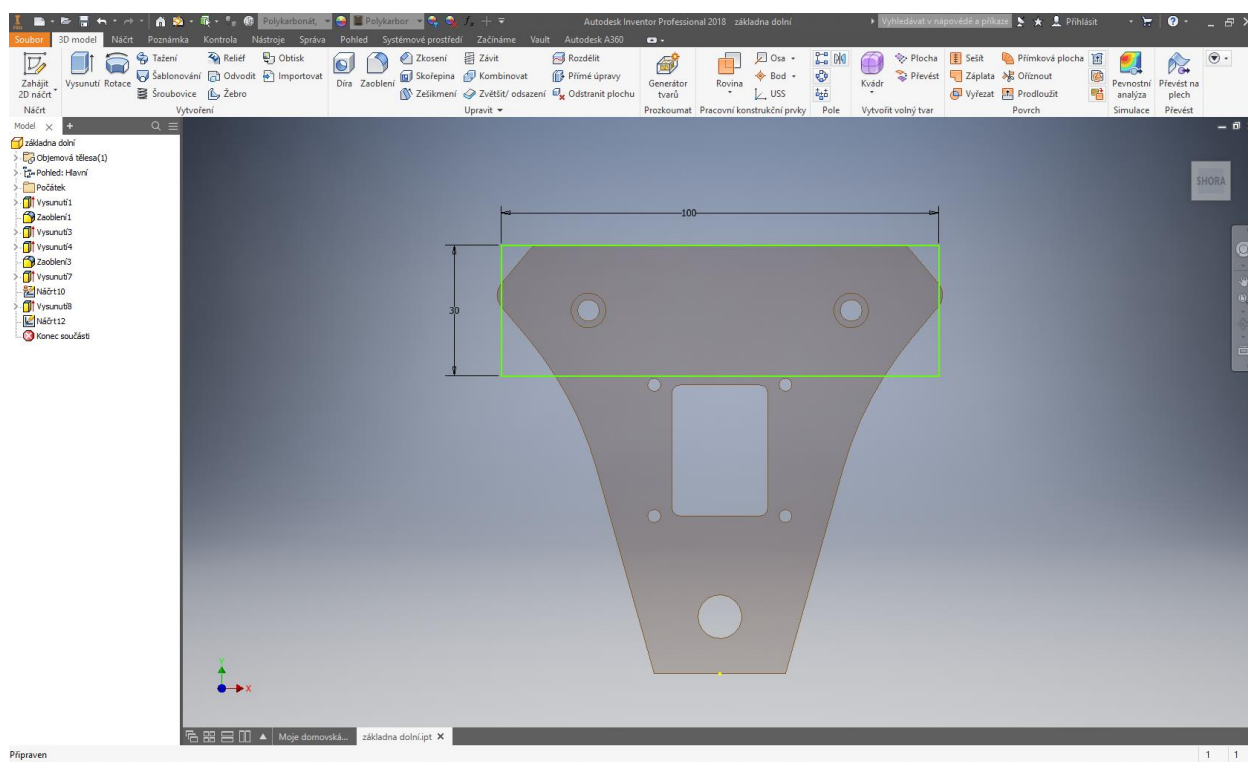
4 Aplikační část a diskuse výsledků

4.1 Aplikační část

4.1.1 Výroba základny dronu Trikoptéra 250

Díky tomu, že jsme si zvolili dron třídy 250, naše rozměrové parametry byly již od začátku pevně dané, mohli jsme si ale vyhrát s designovou stránkou základny.

Návrh byl vymodelován v programu Adobe Inventor 2018



Obr. 14. Základna a díry s osovou vzd. 60 mm (VLASTNÍ, 2019)

Vnější kola jsou od sebe vzdáleny 60mm.

4.1.2 Modelování a výpočet ozubých kol

Ozubení bude přímé se šikmými zuby. Osová vzdálenost mezi největšími vnějšími ozubenými koly je 60 mm. Servo výstup činí 140° . Požadovaný pracovní úhel ramen je $0-120^\circ$. Šířku ozubeného kola volíme podle materiálu (Nylon) 4 mm. Úhel sklonu zubů je $\beta = 40^\circ$ a úhel záběru $\alpha = \alpha_n = 20^\circ$. Smysl stoupání boční křivky zubu soukolí 1 je levotočivý.

Převodový poměr jsme vypočítali ze vztahu

Servo výstup / Soukolí ramen = $160^\circ / 120^\circ = 1,166$

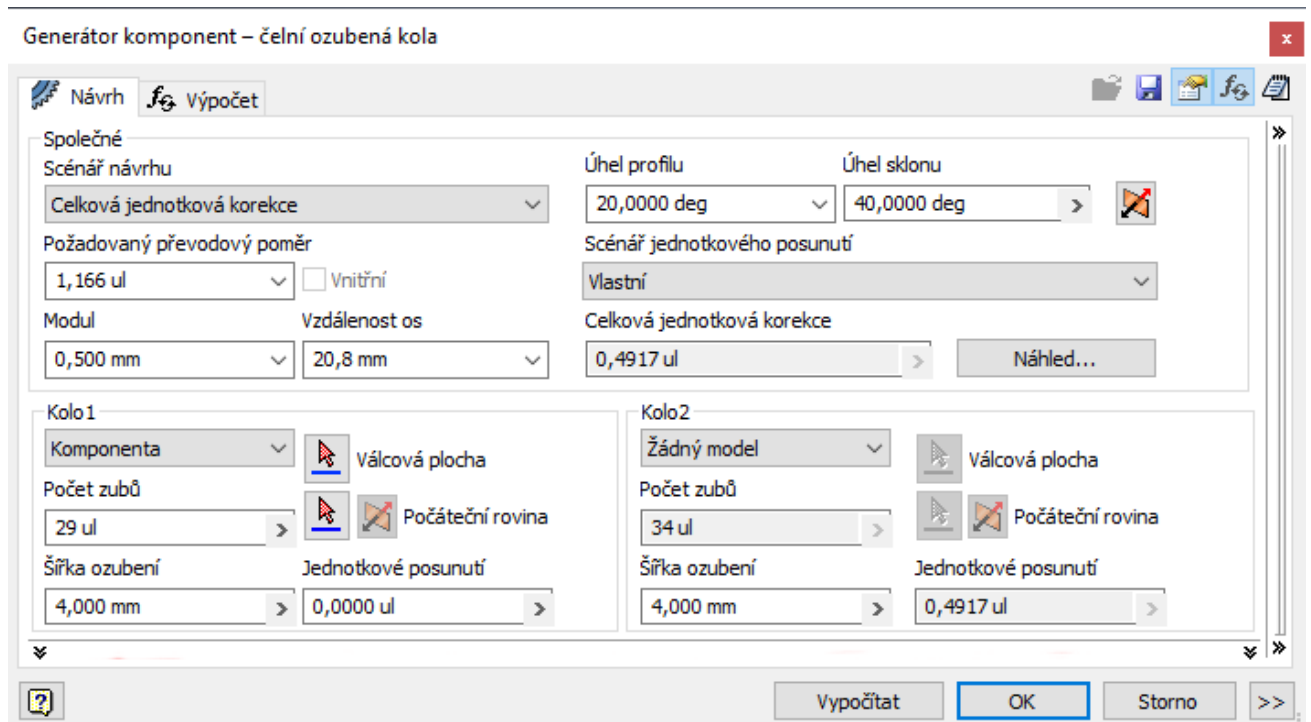
Modul je 0,5 mm

Počet zubů kola 1 je 29.

Šířka ozubení = 4 mm

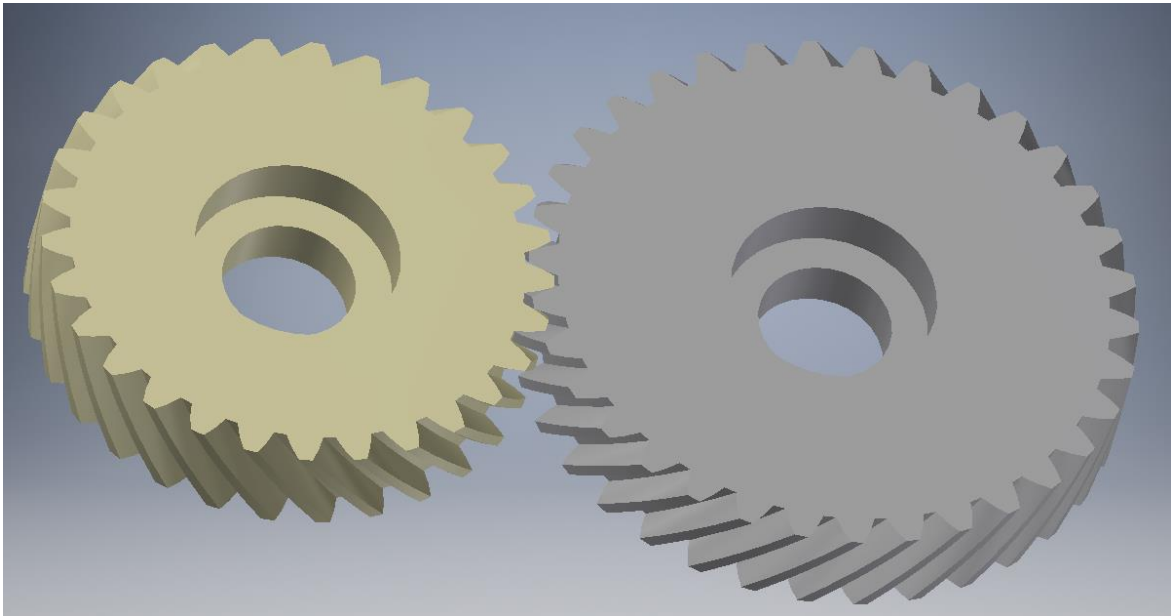
Jednotkové posunutí volíme 0

Následné parametry zadáme do programu Adobe Inventor Professional 2018 do Generátoru komponent. Do kolonky SPOLEČNÉ – SCÉNÁŘ NÁVRHU zadáme CELKOVÁ JEDNOTKOVÁ KORELACE.



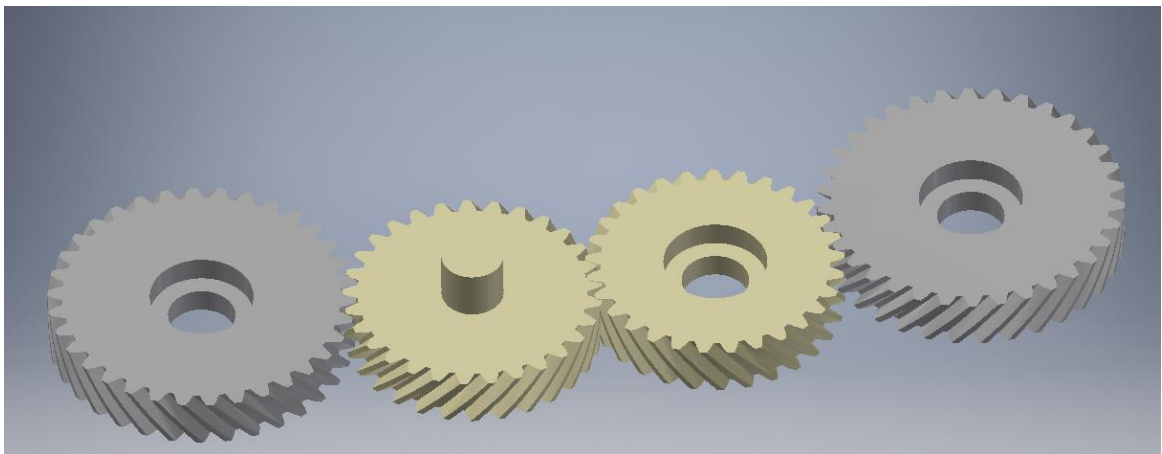
Obr. 15. Návrh čelního ozubení se šikmými zuby (VLASTNÍ, 2019)

Po vyplnění tabulky potvrdíme tlačítko OK a vygeneruje se nám ozubení



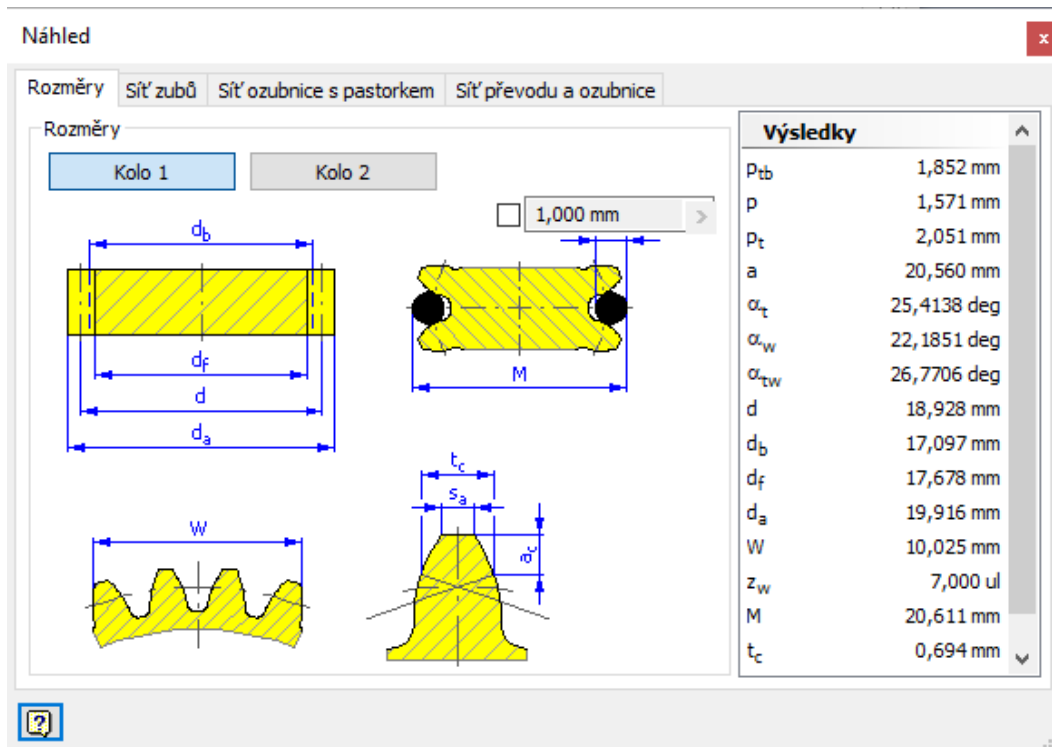
Obr. 16. 1. soukolí (VLASTNÍ, 2019)

Tento postup opakujeme i pro druhou stranu soukolí, jen zvolíme smysl otáčení pravotočivý. Sestavu ozubení propojíme vazbou.



Obr. 17. Sestava pravotočivých a levotočivých soukolí (VLASTNÍ, 2019)

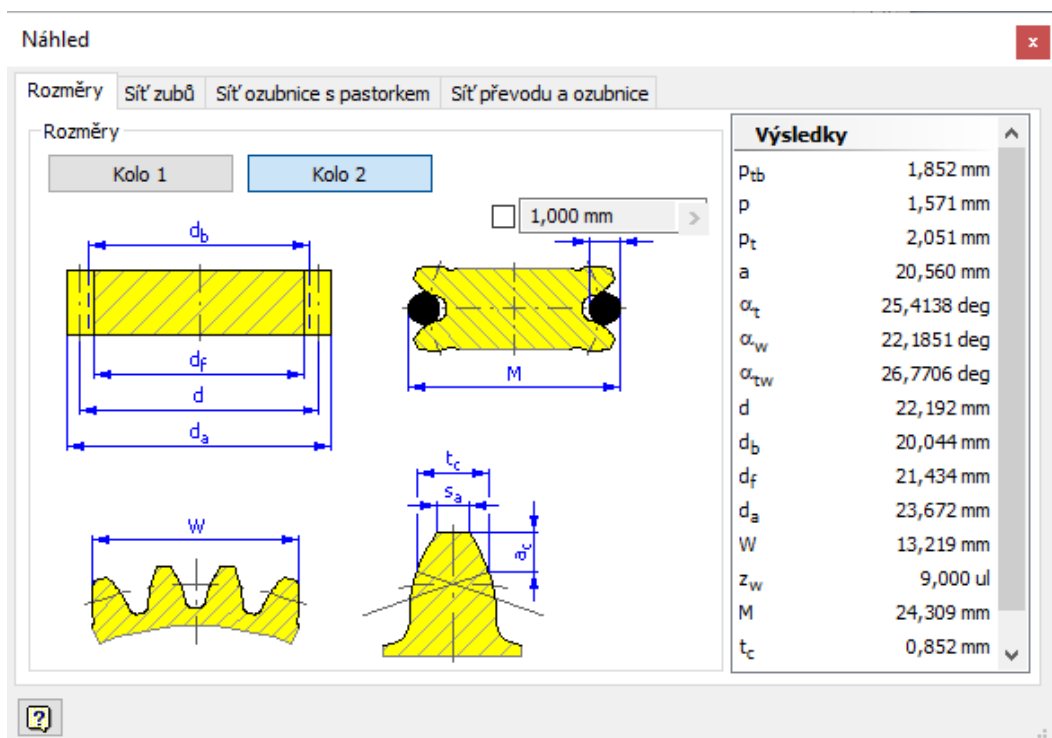
Rozměr Kola 1



Obr. 18. Rozměry Kola 1 (VLASTNÍ, 2019)

$$a_c = 0,368 \text{ mm}$$

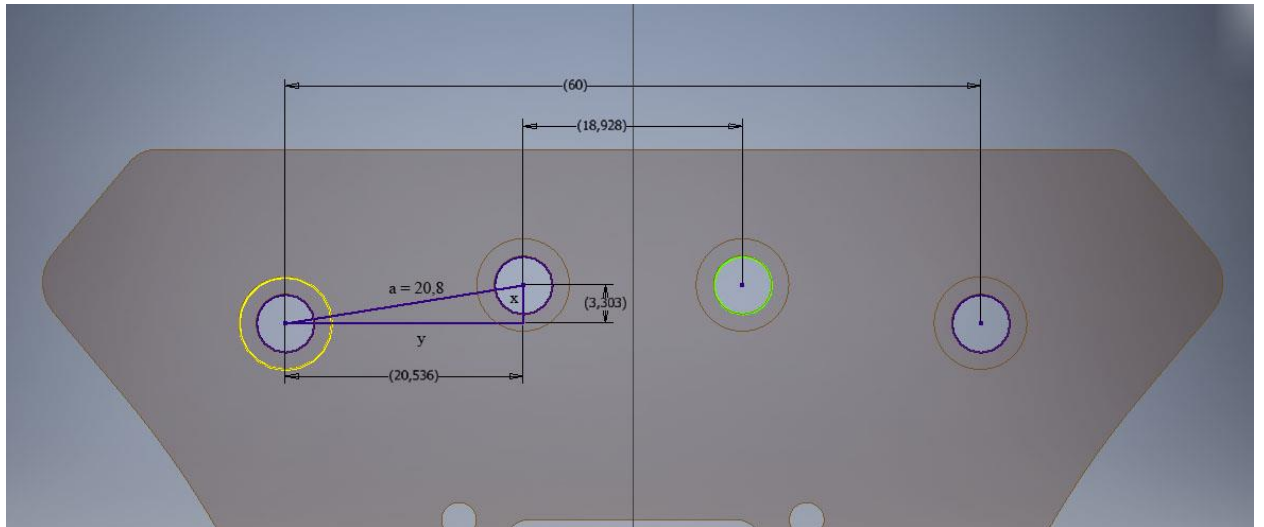
Rozměr Kola 2



Obr. 19. Rozměry Kola 2 (VLASTNÍ, 2019)

$$a_c = 0,585$$

4.1.3 Výpočet osové vzdálenosti dvou středních kol



Obr. 20. Výpočet a posun osových vzdáleností děr a ozubených kol (VLASTNÍ, 2019)

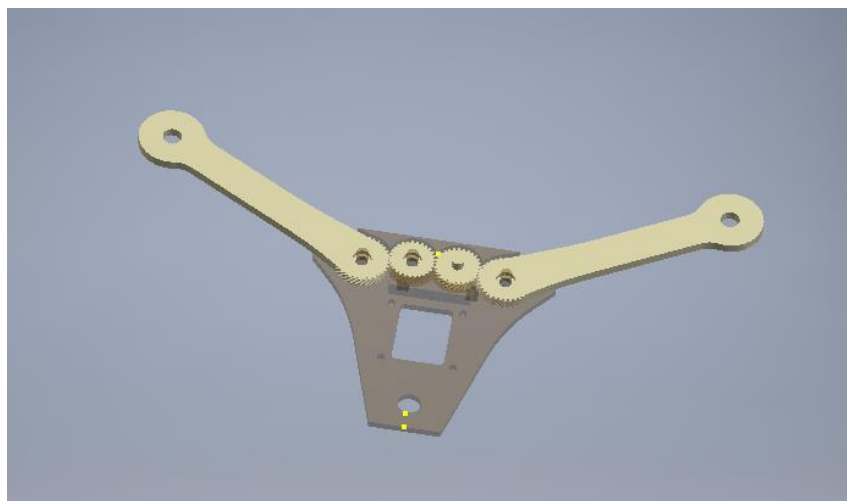
$$a^2 = x^2 + y^2$$

$$x = \sqrt{a^2 - y^2}$$

$$x = 3,3034 \text{ mm}$$

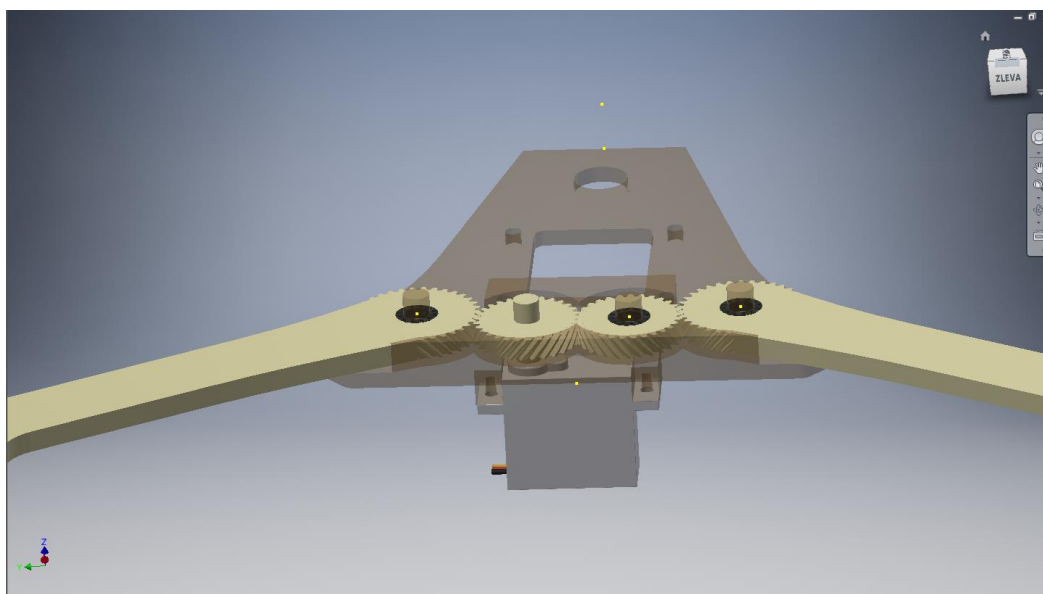
4.1.4 Vložení ozubených kol do základny

Vložíme ozubená kola do základny a zavazbíme. Následně vytvoříme kryt ozubení. K vnější ozubeným kolům domodelujeme ramena pro úchyt motorů a nastavíme úhel ramen na 120° od sebe.



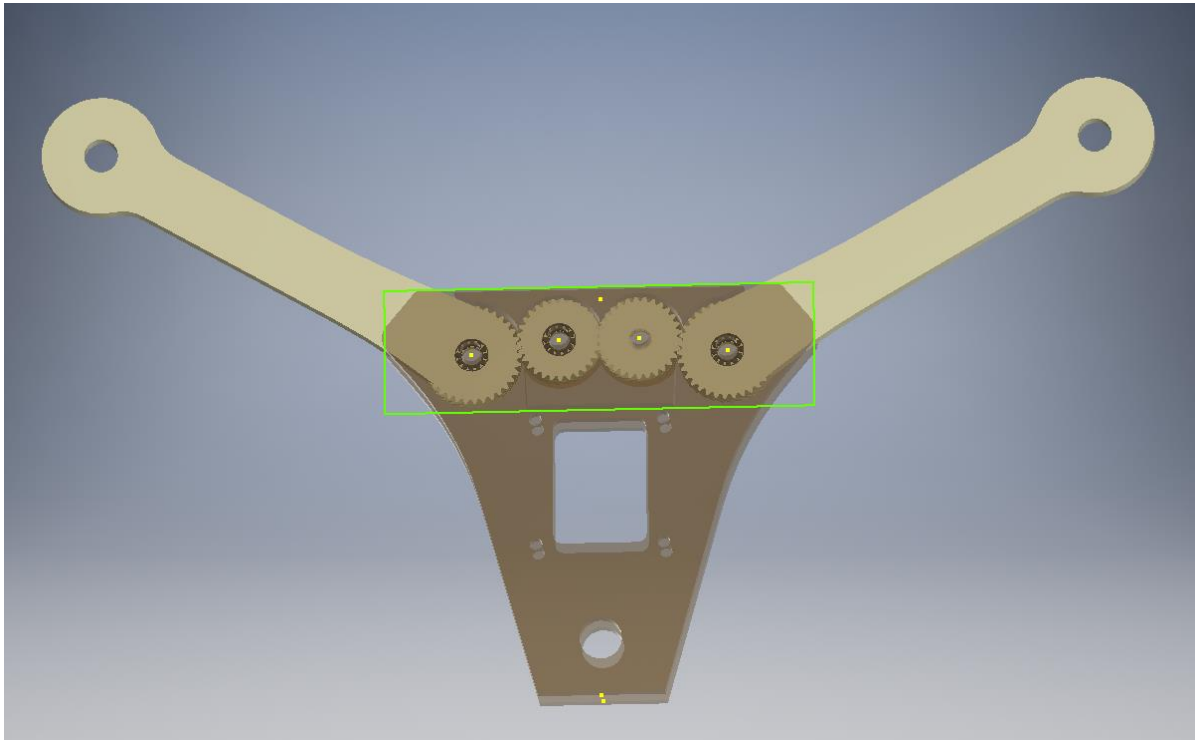
Obr. 21. Vložení ozubených kol do základny (VLASTNÍ, 2019)

Vymodelujeme ložiska i servo a přidáme jej do naší sestavy. Servo je k základně fixováno v ložích a zajištěno dvěma šrouby. Točivý moment serva se napřímo přenáší do ozubení.



Obr. 22. Vložení ozubených kol do základny i s ložisky (VLASTNÍ, 2019)

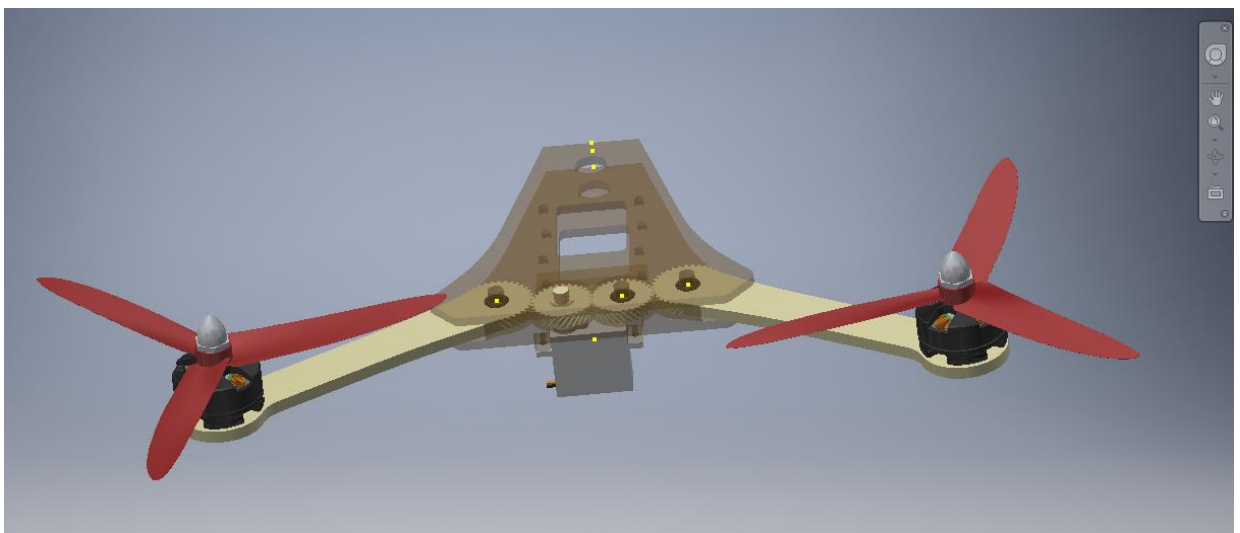
Pro kontrolu si promítneme jelou sestavu do našeho pracovního prostoru a vidíme, že jsme splnili naše počáteční požadavky.



Obr. 23. Kontrola dodržení pracovního prostoru (VLASTNÍ, 2019)

4.1.5 Konečná fáze s elektronikou

Doděláme druhou horní základnu, vymodelujeme motory i vrtule a náš koncept je hotov.



Obr. 24. osazení ramen elektronikou (VLASTNÍ, 2019)

4.2 Diskuse výsledků

Pro zadané veličiny nám výpočty vychází takto:

Generátor komponent – čelní ozubená kola

Návrh **Výpočet**

Metoda pevnostního výpočtu
ISO 6336:1996

Zatížení

	Kolo 1	Kolo 2
Výkon	P 1,000 kW	0,980 kW
Otáčky	n 1000,00 rpm	852,94 rpm
Krouticí moment	T 9,549 N m	10,972 N m
Účinnost	η 0,980 ul	

Materiálové hodnoty

Kolo 1 Vlastní

Kolo 2 Vlastní

Mez únavy v ohybu	σ_{Flim} 352,0 MPa	352,0 MPa
Mez únavy v dotyku	σ_{Hlim} 1140,0 MPa	1140,0 MPa
Modul pružnosti	E 206000 MPa	206000 MPa
Poissonova konstanta	μ 0,300 ul	0,300 ul
Tepelné zpracování	2 ul	2 ul

Požadovaná životnost L_h 10000 hr

Součinitelé Přesnost

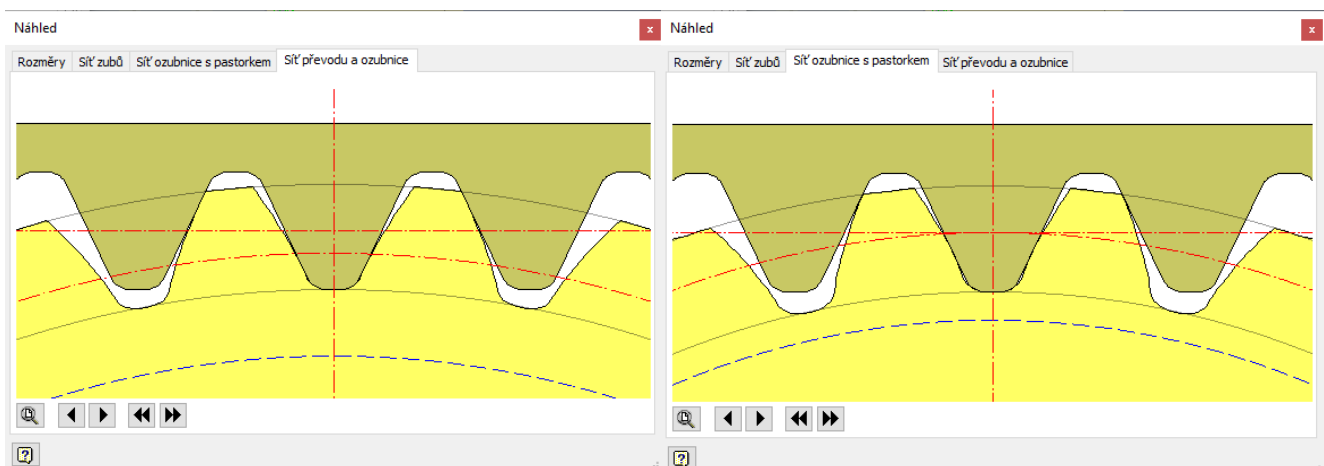
Vypočítat OK Storno >>

Výsledky

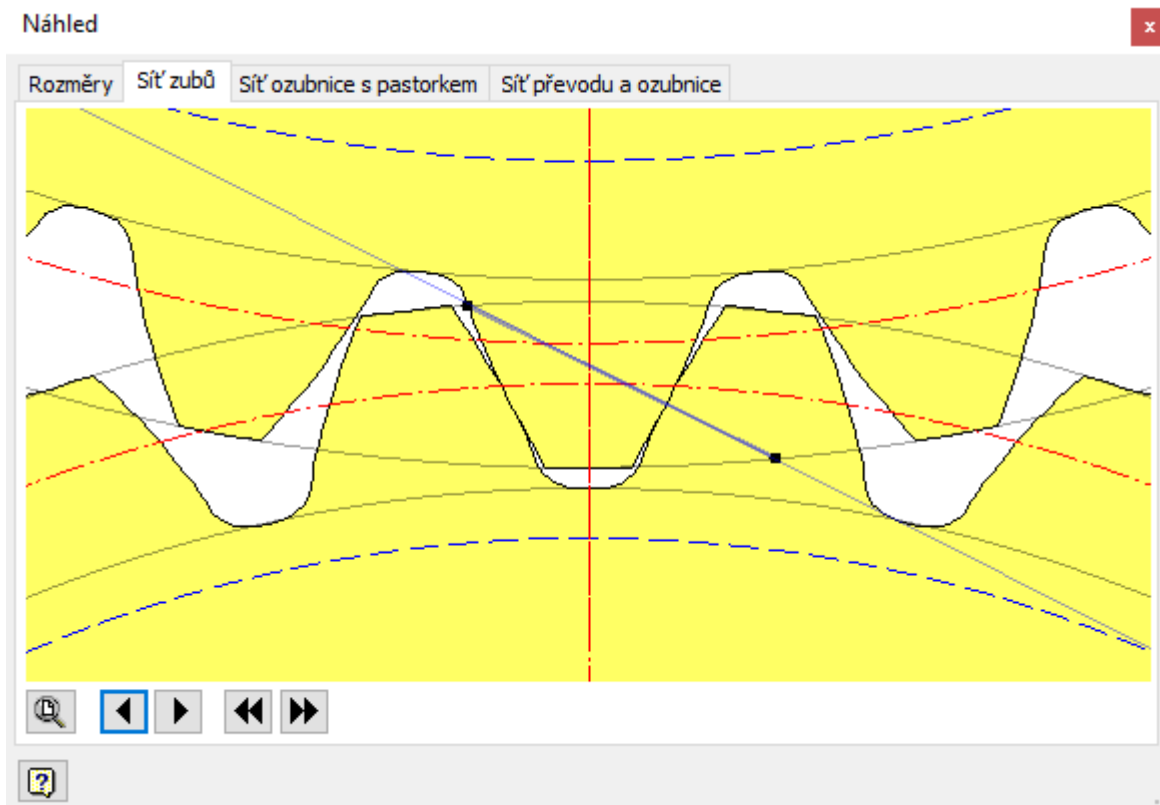
F_t	997,357 N
F_r	503,158 N
F_a	836,882 N
F_n	1406,048 N
v	0,991 mps
n_{E1}	47399,182 rpm
Kolo 1	
S_H	0,587 ul
S_F	0,397 ul
S_{Hst}	0,472 ul
S_{Fst}	0,670 ul
Kolo 2	
S_H	0,587 ul
S_F	0,413 ul
S_{Hst}	0,472 ul
S_{Fst}	0,667 ul

Obr. 25. Výpočty pevnostní (VLASTNÍ, 2019)

Zuby dokonale dosedají a mají dostatečnou vůli. Nedochází k podřezávání zubů.

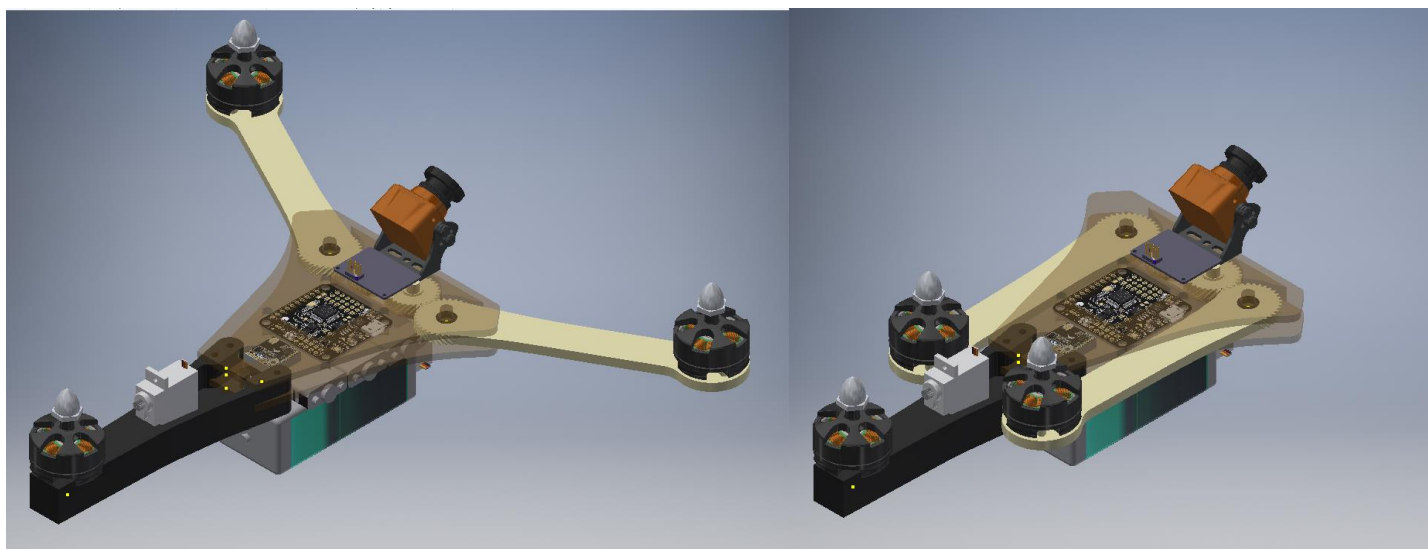


Obr. 26. Animace chodu zubů (VLASTNÍ, 2019)



Obr. 26. Síť zubů (VLASTNÍ, 2019)

Model jsme zkompletovaly. Přidali elektroniku a zadní rameno. Po nastavením rotace ozubení se nám ramena sklápí od 0 do 120°.



Obr. 26. Sklápění ramen 0-120° (VLASTNÍ, 2019)

4.3 Návrhy opatření

Celý mechanismus následně otestujeme v praxi, kde se vystaví účinkům tahu motoru a provozním teplotním podmínkám. Budeme sledovat i životnost ozubení / ložisek, které budou vystaveny vlhkosti a prachovým či pylovým nečistotám a mnoha dalším faktorům.

5 Závěr

Ozubený převod jsme „v programu Adobe Inventor Professional 2018“ navrhli, vypočítali, sestrojili a naanimovali pohyb ozubených kol. Díky točivému momentu serva (s pracovním úhlem 140°) a použitou převodovkou (s přímým ozubením se šikmými zuby) se moment přenesl až na ramena. Ty pak dokážou pracovat v rozsahu od 0 do 120° . Použitý materiál Nylon je jeden z nejlepších dostupných 3D tištěných materiálů, které jsme pro naši převodovku mohli použít. Má vynikající vlastnosti (pevnost, odolnost, vysokou adheznost, nízký součinitel tření a vysokou teplotu tání) a při zachování poměrně malé hmotnosti. Vytvořili jsme funkční převodovku, která bude nadále testována na dronu Trikoptéra Elektra 250.

Seznam zdrojů

CREATIVEMECHANISMS, 2015, In: <https://www.creativemechanisms.com/> [online] [cit 2019-3-10] Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes>

ELUC, 2018, In: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/> [online] [cit 2019-3-18] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1904>

E-KONSTRUKTER, 2015, In: <https://e-konstrukter.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-ruzny-mi-druhy-lozisek>

MLGEARDESIGNS, 2013, <http://mlgeardesigns.blog.cz/> In: [online] [cit 2019-3-8] Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/jak-zjistit-modul-ozubeneho-kola>

MOODLE, 2015, In: <https://www.moodle-trebesin.cz/> [online] [cit 2019-3-16] Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9978/mod_resource/content/0/OZUBEN%C3%81%20KOLA%20%C4%8CELN%C3%8D.pdf

PRUMEX, 2019, In: <https://www.prumex.cz/> [online] [cit 2019-4-7] Dostupné z: <https://www.prumex.cz/lozisko-mr85-ezo/>

Prusa Research s.r.o., 2019, In: <https://shop.prusa3d.com/cs/> [online] [cit 2019-4-20] Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/716-prusament-pla-azure-blue-1kg.html>

SERVOCITY, 2019, In: <https://www.servocity.com/> [online] [cit 2019-4-10] Dostupné z: <https://www.servocity.com/hs-45hb-servo>

SLIDEPLAYER, 2017, In: <https://slideplayer.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5934847/>

SOLIDIFY 3D s.r.o., 2017, In: <https://www.materialpro3d.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>

SOLIDIFY 3D s.r.o., 2017, In: <https://www.materialpro3d.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

SOLIDIFY 3D s.r.o., 2017, In: <https://www.materialpro3d.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>

SOLIDIFY 3D s.r.o., 2019, In: <https://www.materialpro3d.cz/> [online] [cit 2019-4-16] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/nylon-pajet-1-75mm-natural-0-5-kg-filament-pm/?fbclid=IwAR0WFvggAFKMQIqI-2Y52p3oO6uNs2ToeMKGckbraMDxMui6cuncd7sjbyk>

SOLIDVISION, S.R.O, 2017, In: <http://www.mujsolidworks.cz/> [online] [cit 2019-4-7] Dostupné z: <http://www.mujsolidworks.cz/postup-modelovani-celniho-ozubeneho-kola-se-sikmymi-zuby/>

VINK - PLASTY S.R.O., 2019, In: <http://www.vink.cz/> [online] [cit 2019-3-14] Dostupné z: <http://www.vink.cz/polyamid>

VYORALEK, 2017, In: <https://blog.vyoralek.cz/> [online] [cit 2019-3-9] Dostupné z: <https://blog.vyoralek.cz/3d-tiskarny/jaky-pouzit-material-3d-tisk-pla-vs-abs/>

ZKL TECH TOOLS, A.S, 2015, In: <http://www.zkl.cz/cs> [online] [cit 2019-3-10] Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/katalog/loziska>

Seznam použitých zkratek

3D Three dimensional	L_h požadovaná životnost
A a roztečná vzdálenost os	M rozměr přes válečky
ABS Akrylonitrilbutadienstyren	m_n normálový modul
a_c výška hlavy zubu nad tětivou	m_t čelní modul
b šířka ozubení	n otáčky
c_a hlavová	n_{EI} rezonanční otáčky
d průměr roztečné kružnice,	P Výkon
D roztečná kružnice	p rozteč zubů
D_a výška hlavy zubu	PA Polyamid
d_a průměr hlavové kružnice	PLA Polylactic acid
D_b základní kružnice	PE Polyethylen
D_f patní kružnice	PP Polypropylen
d_f průměr patní kružnice,	PS Polystyren
d_b průměr základní kružnice	p_t čelní rozteč
e zubní mezera,	p_{tb} základní rozteč
E modul pružnosti	S_F součinitel bezpečnosti v ohybu
F_a axiální síla	S_{Fst} statická bezpečnost v ohybu
F_n normální síla	S_H součinitel bezpečnosti v dotyku
F_r radiální síla	S_{Hst} statická bezpečnost v dotyku
F_t obvodová síla	s_n normálová tloušťka zubu
h mezi hlavovou a patní kružnicí je výška zubu,	s_t čelní tloušťka zubu
h_a výška hlavy zubu	T krouticí moment
h_f výška paty zubu	t_c tloušťka zubu na tětivě
L stoupání šroubovice	t_n normálová rozteč
	t_t rozteč zubů

v obvodová rychlost

W rozměr přes zuby

z počet zubů

z_w rozměr přes zuby

$\alpha = \alpha_n$ úhel záběru

α_t čelní úhel profilu

α_{tw} čelní provozní úhel záběru

α_w provozní úhel záběru

α_t čelní úhel záběru

β úhel sklonu zubů

π pí – 3,14159

η Účinnost

μ Poissonova konstanta

σ_{Flim} mez únavy v okybu

σ_{Hlim} mez únavy v dotyku

ψ_m součinitel poměrné šířky ozubení

Seznam tabulek popř. obrázků

Tab: 1. Vlastnosti materiálu PLA pro 3D tisk (MATERIÁLPRO 3D A BLOG.VYORALEK, 2017)

Tab: 2. Parametry serva HS-45HB (SERVOCITY, 2019)

Obr. 1. Vyznačený pracovní prostor na základně (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 2. PLA filament (PRUSA , 2019)

Obr. 3. Nylon PAJet (MATERIÁLPRO 3D, 2017)

Obr. 4. Servo HS-45HB (SERVOCITY, 2019)

Obr. 5. Ložisko MR 85 EZO (PRUMEX, 2019)

Obr. 6. Pastorek a ozubené kolo (ELUC, 2018)

Obr. 7. Převody s rovnoběžnými osami (ELUC, 2018)

Obr. 8. Převody s různoběžnými osami (ELUC, 2018)

Obr. 9. Převody s mimoběžnými osami (ELUC, 2018)

Obr. 10. Převody s mimoběžnými osami (MLGEARDESIGNS, 2013)

Obr. 11. Rozměry soukolí (MLGEARDESIGNS, 2013)

Obr. 12. Kuličkové ložisko (E-KONSTRUKTER, 2015)

Obr. 13. Sklon zubu (SLIDEPLAYER, 2017)

Obr. 14. Základna a díry s osovou vzd. 60 mm (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 15. Návrh čelního ozubení se šikmými zuby (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 16. 1. soukolí (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 17. Sestava pravotočivých a levotočivých soukolí (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 18. Rozměry Kola 1 (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 19. Rozměry Kola 2 (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 20. Výpočet a posun osových vzdáleností děr a ozubených kol (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 21. Vložení ozubených kol do základny (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 22. Vložení ozubených kol do základny i s ložisky (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 23. Kontrola dodržení pracovního prostoru (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 24. osazení ramen elektronikou (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 25. Výpočty pevnostní (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 26. Animace chodu zubů (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 26. Síť zubů (VLASTNÍ, 2019)

Obr. 26. Sklápění ramen 0-120° (VLASTNÍ, 2019)