

**Vysoká škola technická a ekonomická**

v Českých Budějovicích

# **Seminární práce**

**Jan Večerek**

*2019*

**Vysoká škola technická a ekonomická**  
v Českých Budějovicích katedra Strojírenství

**Animace průhybu ramene**  
**Trikoptéry Elektra**

**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

.....

A handwritten signature in black ink, written in a cursive style, is displayed within a light blue rectangular box. The signature appears to be 'J. Kurek'.

vlastnoruční podpis

# Obsah

1	Úvod.....	5
2	Cíl práce.....	6
3	Teoreticko-metodologická část.....	7
	3.1 Literární rešerše.....	7
	3.2 Úvod do problému.....	8
	3.3 Kvadratický moment průřezu .....	16
	3.4 Průřezový modul v ohybu.....	17
	3.5 Kvadratické momenty a průřezové moduly v ohybu jednoduchých ploch .....	18
	3.5.1 Kruhový průřez.....	18
	3.5.2 Mezikruhový průřez .....	19
	3.6 Ohyb .....	20
	3.7 Moduly průřezu v ohybu $W_0$ .....	21
	3.8 Mechanické napětí .....	21
	Napětí při osovém tahu.....	21
	Napětí při osovém tlaku.....	22
	Napětí při kroucení.....	22
4	Aplikační část a diskuse výsledků .....	23
	4.1 Návrh a konstrukce ramene Trikoptyéry Elektra.....	23
	4.2 Výpočet vetknutého nosníku .....	23
	4.3 Výpočet sil působících na nosník.....	25
	4.4 Diskuse výsledků .....	29
5	Závěr.....	33
	Seznam zdrojů.....	34
	Seznam použitých zkratk .....	35
	Seznam tabulek popř. obrázků.....	36

# 1 Úvod

V seminární práci se budeme věnovat materiálům (PET, PETG a CFRP), které jsme použili k výrobě ramene Trikoptéry Elektra. Model ramene vytvořený v programu Autodesk Inventor 2018 podrobíme pevnostní zkoušce. Rameno zatížíme stejnými silami, kterým bude podléhat v reálném provozu. Provedeme výpočet osového zatížení vetknutého nosníku (uhlíkové trubičky) ve 3D tištěném spoji. Vytvoříme simulaci a zprávu pevnostní analýzy.

## **2 Cíl práce**

Cílem seminární práce je vytvořit simulaci ramene Trikopty Elektra při zatížení, kterému bude podléhat v provozu. Provést pevnostní analýzu a zjistit, zda-li jsou použité materiály vyhovující.

# 3 Teoreticko-metodologická část

## 3.1 Literární rešerše

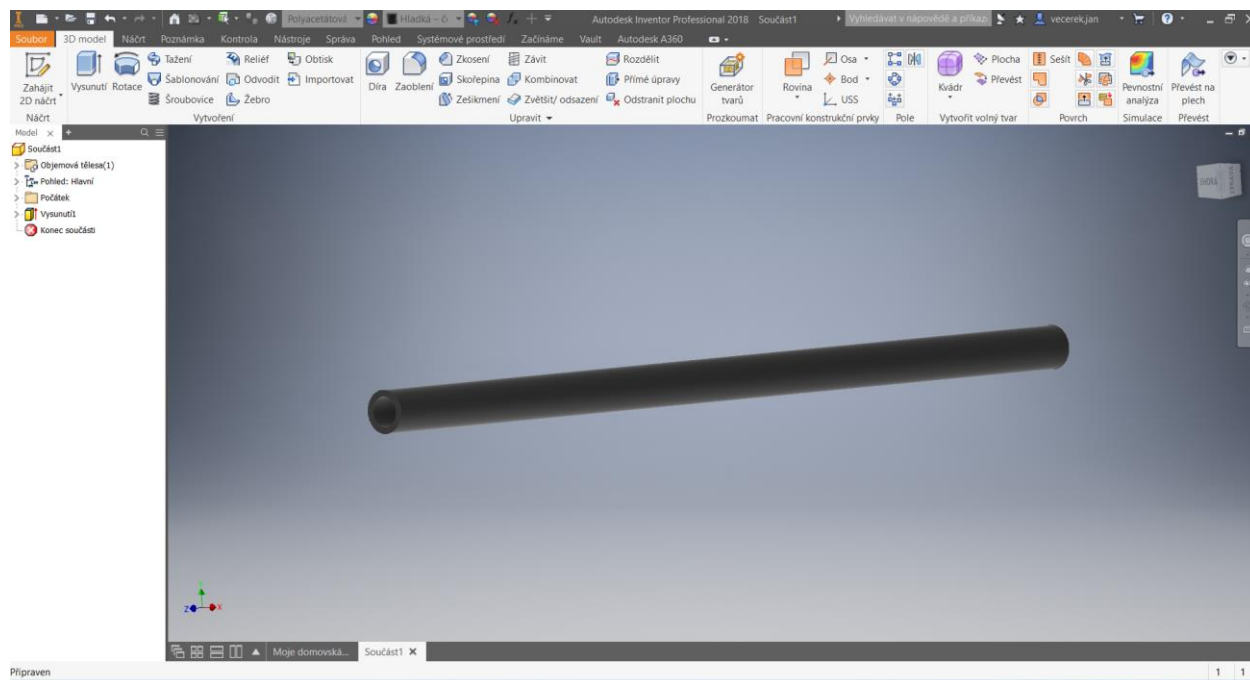
K danému tématu nám bylo poskytnuto v Informačním systému v sekci učební materiály velké množství odborné literatury i materiálů z kterého máme možnost čerpat.

Dalšími zdroji informací se mi staly prezentace ze serveru slideplayer.cz. Prezentace byly stručné přitom s výstižným obsahem. Výpočty se vzorečky jsem čerpal z portálu E-konstrukter.cz. A díky stránce airspace.cz jsem pochopil, jak vypočítat sílu, která působí vlivem motoru s vrtulí na rameno.

## 3.2 Úvod do problému

### 3.2.1 Uhlíková trubička

V projektu Trikoptéra byla použita 3x uhlíková trubička, která tvoří nosnou část ramen s motory a vrtulí. Vnitřní průměr uhlíkové trubičky je 5 mm a vnější činí 7 mm. Délka trubiček byla zkrácena na 160mm. Vnitřkem budou protaženy 3 kabely vedoucí od motoru k regulátoru. Model v měřítku 1:1 byl vymodelován v programu Autodesk Inventor 2018.



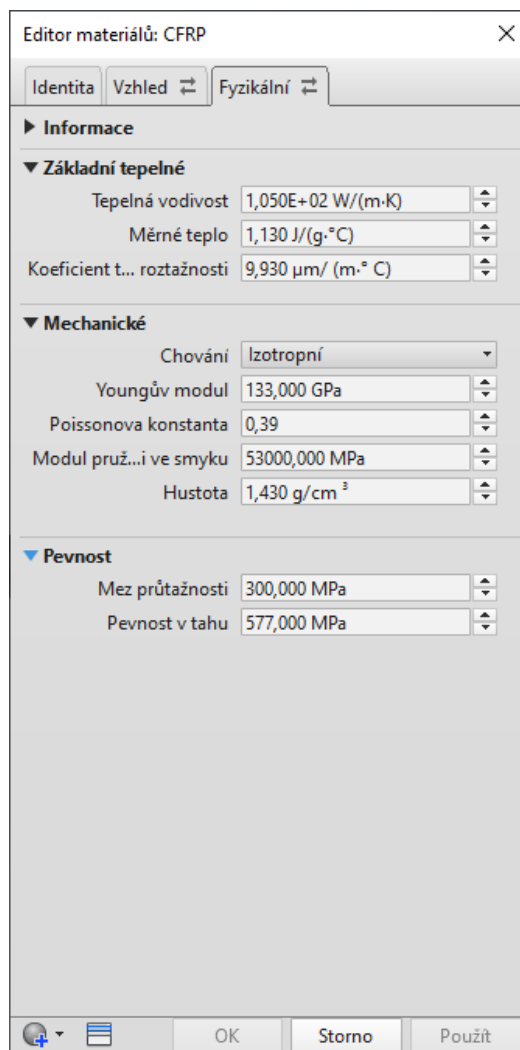
Obrázek 1 Uhlíková trubička (Vlastní)

V knihovně materiálů jsem modelu přiřadil vlastnosti materiálu CFRP, které jsou srovnatelné s vlastnostmi naší uhlíkové trubičky.

CFRP je zkratka pro “Carbon-fiber-reinforced polymer” nebo “Carbon-fiber-reinforced plastic”. Ve zkratce – uhlíková vlákna nebo uhlíkovými vlákny tvrzené plasty. V současné době jde o často skloňovanou zkratku v oblasti automobilového průmyslu. Tento nový typ umělých hmot totiž může výrazně snížit hmotnost automobilů, a tím i jejich spotřebu.

**Uhlíkové vlákno nebo také karbonové vlákno**, resp. kompozity z něj vyrobené, se dnes využívají v oblasti letectví, větrných elektráren, vojenství, pro výrobu sportovního náradí (cyklistika, golf) a čím dál častěji některých komponent v automobilovém průmyslu (části karoserií, nárazníky). V nejvyšších motoristických soutěžích se CFRP používají již delší dobu a velmi extenzivně. [14]





Obrázek 2 Parametry CFRP definované v programu Autodesk Inventor Professional 2018 (Vlastní)

#### Další vlastnosti potřebné pro naše výpočty materiálu Carbon Fiber Reinforced polymer

Obecné vlastnosti	Testovací metoda	Hodnota
<b>Hustota</b>	<b>ASTM D792</b>	<b>1,27 g/cm<sup>3</sup></b>
Absorpce vlhkosti (24 hrs @ 23 °C)	ASTM D570	< 0,2%
Rozpustnost ve vodě	DIN 53122	nerozpustný
<b>Mechanické vlastnosti</b>	<b>Testovací metoda</b>	<b>Hodnota</b>
Pevnost v tahu	ASTM D638	53,7 MPa
Pevnost v tahu při přetržení	ASTM D638	26,2 MPa
Modul pružnosti v tahu	ASTM D790	2150 MPa
Izod (zkouška vrubové houževnatosti)	ASTM D256	91 J/m
Tvrdość podle Rockwella	ASTM D785	116

Tepelné vlastnosti	Testovací metoda	Hodnota
Teplota měknutí podle Vicata (B)	ASTM D125	82,8 °C
Koeficient lineární teplotní roztažnosti	DIN EN ISO 75-2	0,04 – 0,05 mm/m°C
Teplota použití	–	– 20 °C až + 60 °C
Elektrické vlastnosti	Testovací metoda	Hodnota
Dielektrická pevnost	ASTM D149	16 kV/mm
Měrný povrchový odpor	ASTM D287	1016 Ω

**Tabulka 1 Carbon Fiber Reinforced polymer vlastnosti [8]**

### 3.2.2 PETG Průšament oranžový



**Obrázek 3 Filament PETG Průša [1]**

PETG je velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. PETG má univerzální využití, ale je zejména vhodný pro tisk mechanických částí. Je možné jej použít v interiérech i exteriérech. PETG má velmi malou tepelnou roztažnost, na podložce se tedy nekrotí a tudíž není problém s tiskem velkých modelů. Díly na naše tiskárny jsou tištěny právě z PETG!

PETG je jedním z našich oblíbených materiálů pro 3D tisk. Tisknout s ním je téměř stejně snadné jako s PLA, ale na rozdíl od PLA může nabídnout mnoho lepších mechanických vlastností. Písmeno G v zkratce PETG označuje glykol, který se přidává během výrobního procesu. Glykol modifikuje vlastnosti PET, aby byl méně křehký, snadnější pro tisk a více průhledný při tisku s poloprůhlednými variantami. PETG má nízkou tepelnou roztažnost, takže i při tisku velkých modelů se zřídka zkroutí a odlepí od vyhřívané podložky. PETG je navíc houževnatý, tak akorát pružný a díky tomu se při namáhání často jen dočasně prohne, což zabrání prasknutí.

Na rozdíl od PLA nebo ABS, PETG má tendenci trochu stringovat, neboli při přejezdu tahat tenká vlákna plastu. Můžete s tím bojovat zvýšením retrakce a snížením teploty, ale pokud používáte

naše přednastavené profily v Slic3ru nebo v Prusa Control, udělali jsme to již za vás a míra stringování by měla být minimální. Pokud se s ním přesto setkáte, můžete se ho zbavit tím, že hotové výtisky rychle (několik vteřin) přejedete horkovzdušnou pistolí.

PETG je univerzální materiál. Výtisky z něj jsou houževnaté, vrstvy se dobře propojují a tak si nemusíte tolik lámat hlavu s orientací modelů. Díky slušné tepelné odolnosti je možné výtisky z PETG použít i pro venkovní užití. [1]

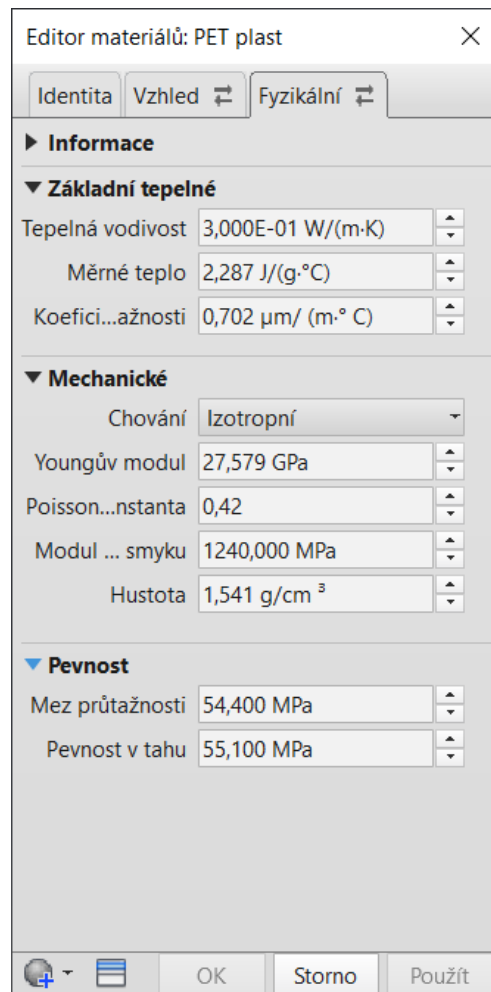
PETG material			
Diameter	1.75MM	Net weight	1KG
Coil size	200MM	Gross weight	1.3KG
Height	74MM	Tensile strength	≥50MPA
Central aperture	54MM	Flexural modulus	≥60MPA
Printing temperature	230-250°C	Elongation at break	≥1.5%
Density	1.01±0.05g/cm3		
Total length	335M		
Water absorption	0.50%		
Dry value	99.99%		

Obrázek 4 Parametry PETG [4]

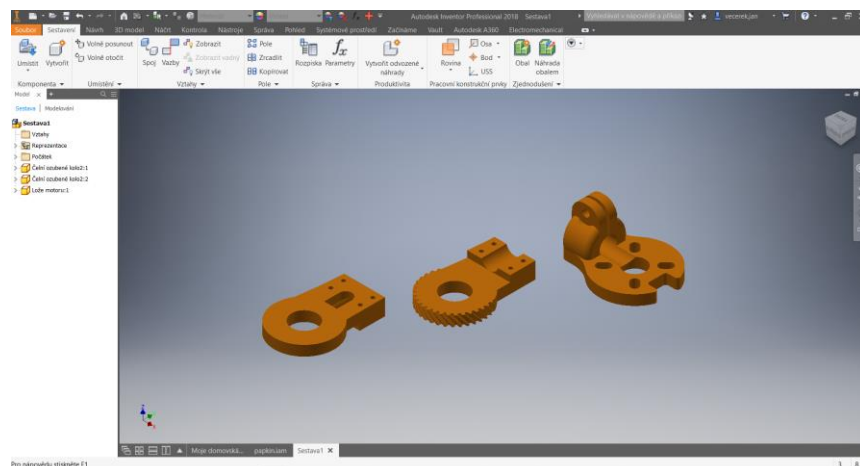
<b>Teplota trysky</b>	220 - 260 °C
<b>Teplota podložky</b>	60 - 90 °C
<b>Tisková podložka</b>	Doporučuje se
<b>Komora při tisku</b>	Nepovinná
<b>Přilnutí první vrstvy</b>	Drobné problémy
<b>Výpary</b>	Silné
<b>Absorbce vlhkosti</b>	Ano
<b>Youngův modul (GPa)</b>	2,2
<b>Modul pružnosti (GPa)</b>	1,9
<b>Pevnost v ohybu (MPa)</b>	64
<b>Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg)</b>	42
<b>Pevnost v tahu (MPa)</b>	53
<b>Odolnost proti nárazu (J/m)</b>	77
<b>Tvrdost Rockwell R</b>	108
<b>Teplota skelného přechodu (°C)</b>	81
<b>Deformace při teplotě (°C)</b>	70
<b>Teplota tání (°C)</b>	140
<b>Tepelná kapacita (J/kg*K)</b>	1200
<b>Tepelná vodivost (W/m*K)</b>	0,29
<b>Tepelná difuzivita (m<sup>2</sup>/s)</b>	0,19

Tabulka 2 Vlastnosti filamentu PETG [9]

Dílům vytvořených a testovaných v programu Autodesk Inventor 2019 byly přiřazeny vlastnosti materiálu PET



Obrázek 5 Parametry PETG definované v programu Autodesk Inventor Professional 2018 (Vlastní)



Obrázek 6 Vytvořené součásti z PETG (Vlastní)

### 3.2.3 Vrtule CW

Originální sada vrtulí Gemfan HQ 6045 CW / CCW (černá).

Vrtule GemFan stanovily zlatý standard v komunitě malých multirotorů. Známy pro svou odolnost, skvělé vyvažování a vynikající centrování nábojů a spotřebovatelnou cenu. Přicházejí v balení jako sada 2, s jednou rotací CW a jednou rotací CCW. K dispozici je široká škála barevných možností, které lze kombinovat a přizpůsobit tak, aby pomohly s orientací na více virů. Toto je perfektní upgrade pro jakýkoli malý multirotor.

Tyto super tuhé 6045 rekvizity dodají vašemu Mini FPV quad další punč, když máte 22mm motory pro zvládnutí vyšší výšky, jako je 2206 „Baby Beast“ nebo 2204 Multistar Elite.

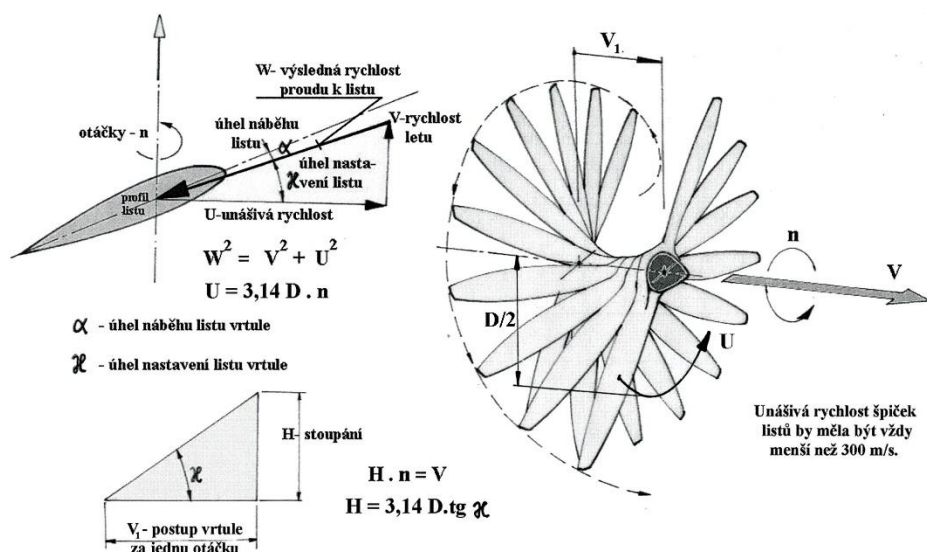
#### Vlastnosti:

Velikost: 6045,(6x4.5)

Barva: Orange

Material: ABS

Úchyt: 6mm (adapters included for 5mm,4mm,3mm,2.5mm) [2]



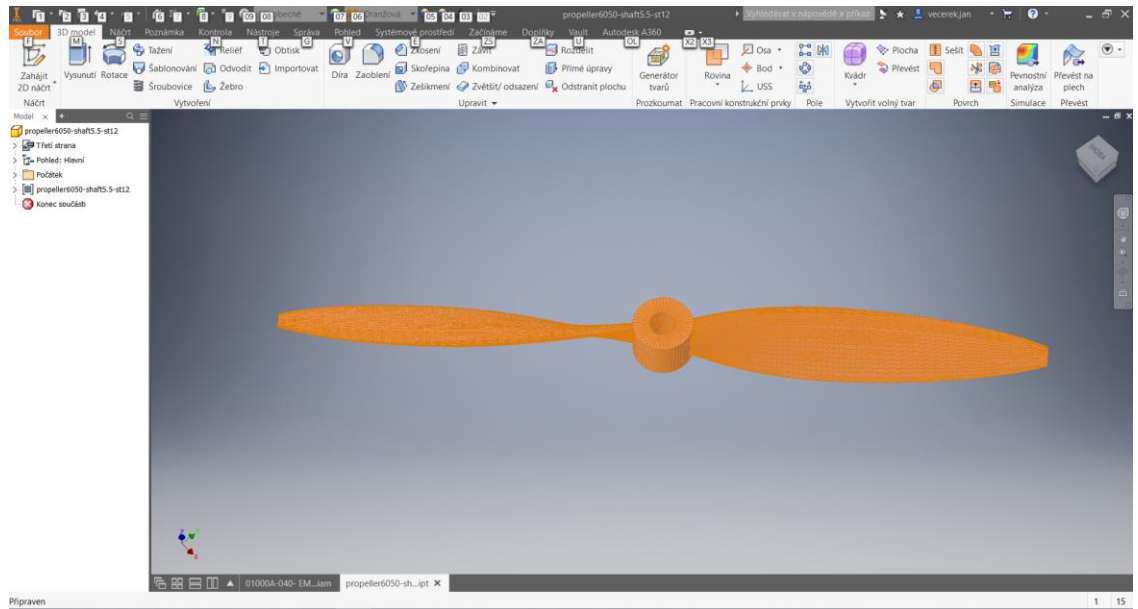
Obrázek 7 Schéma pohybů vrtule za letu [10]

Vrtule je nástrojem pro převod točivého momentu hnacího ústrojí na sílu potřebnou k pohybu letadla v ovzduší země.

Výslednou aerodynamickou sílu vzniklou na rotující vrtuli můžeme rozložit do dvou složek. Do směru letu, tu pak nazýváme **tah**. A do roviny rotace, kde působí na určitém rameni a vytváří tak moment působící proti kroutícímu momentu motoru.

Tato síla – tah, může zajistit dopředný pohyb ať již vodorovný, sestupný, svislý nebo stoupavý (u vrtulníku jsou tyto vrtule nazývány **rotory**) letounům lehčím (vzducholodě) i těžším než vzduch (letadla s pevnými nebo pohyblivými křídly). V těchto případech je třeba potřebný výkon dodat.

[15]



Obrázek 8 Vrtule 6/3 pro Trikotéru Elektra (Vlastní)

### 3.2.4 Motor

#### Emax MT2204 2300KV

Motory jsou speciálně vyvinuty pro použití pro pohon multikoptér a to především pro řadu Drone 250 Race.

#### Specifikace:

Kv: 2300

Max. Tah: 440g

Počet článků LiPol: 2-3S

Framework: 12N14P

Vrtule: 5“-6“

Délka: 32.2mm

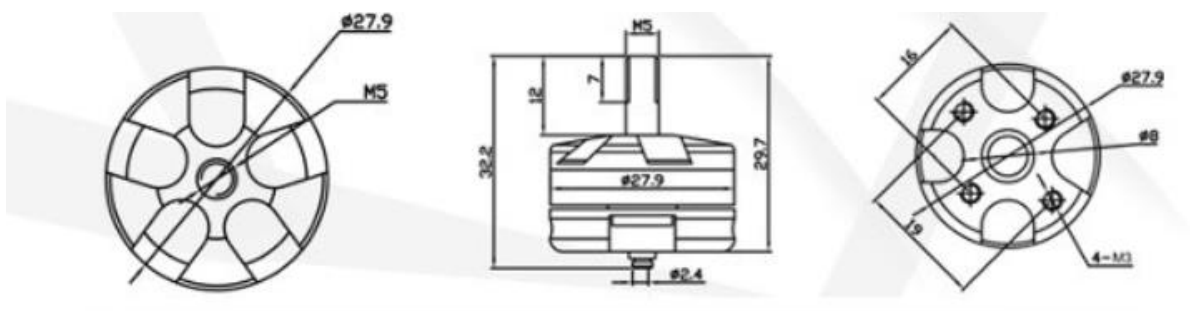
Průměr: 27.9mm

Váha: 25g

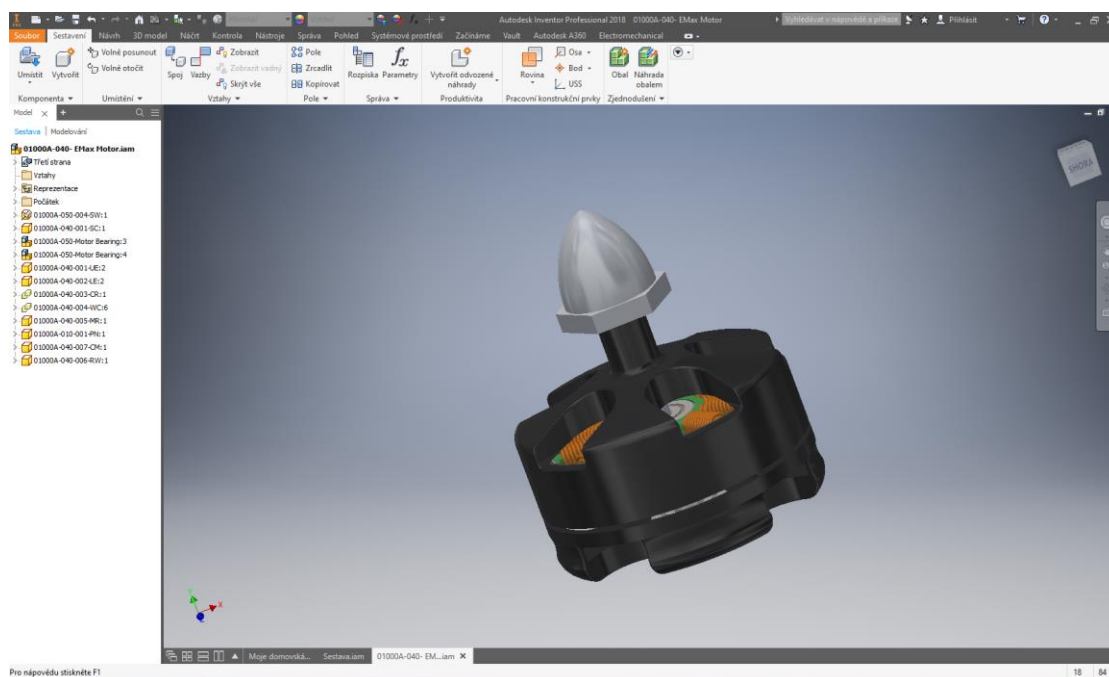
Hřídel: 3mm

Motor	Napětí	Vrtule	Proud (A)	Tah (g)	Výkon (W)	Účinnost (g/W)	Rychlost (RPM)
MT2204 2300Kv	8	6x3 uhlík	6.4	240	51.2	4.7	11910
	12	5x3 uhlík	7.5	310	90	3.4	20100
		6x3 uhlík	11.5	440	138	3.2	16300

Tabulka 3 Parametry motoru [12]



Obrázek 9 Motor EMAX MT2204 2300KV [3]



Obrázek 10 Motor EMAX zpracovaný v programu Autodesk Inventor 2018 (vlastní)

### 3.2.5 Regulátor

#### BLHeli 12A

Regulátor pro střídavé (brushless) elektromotory je vhodný pro použití v letadlech, vrtulnicích i kvadrokoptérách.

## Technické údaje

Trvalý proud max 12A

Nárazový proud max 15A

Rozměry 42x20x8 mm

Hmotnost (g) 11

BEC 1A/5V

Lipol/Lion 2-4 článků

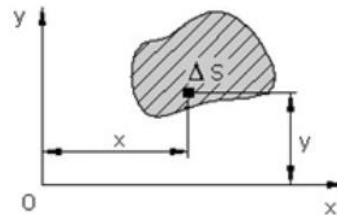
Programovatelný ano [13]

### 3.3 Kvadratický moment průřezu

Tato veličina je charakteristickou průřezovou veličinou pro krut, ohyb a vzpěr. Označujeme ji  $J_x$ ,  $J_y$ ,  $J_z$ , podle osy ke, které kvadratický moment průřezu hledáme

$$J_x = \sum \Delta S \cdot y^2 \quad [\text{mm}^4]$$

$$J_y = \sum \Delta S \cdot x^2 \quad [\text{mm}^4]$$



Obrázek 11 Kvadratický moment průřezu [6]

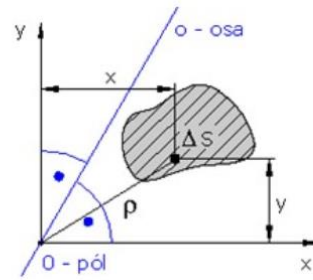
Uvedené vztahy pro kvadratický moment průřezu platí pro jakoukoli osu ležící v rovině průřezu. Součet součinů nekonečně malých plošek a druhých mocnin jejich vzdálenosti od této osy se vztahuje na celou plochu průřezu. Stejný průřez má podle polohy osy různou hodnotu kvadratického momentu průřezu. Protože druhé mocniny vzdálenosti elementů jsou vždy kladné, je kladná i hodnota  $J$  [16]

Dále byl odvozen vzájemný vztah mezi kvadratickými momenty a polárním momentem průřezu: [6]



$$J_p = \sum \Delta S \cdot \rho^2 = \sum \Delta S \cdot (x^2 + y^2) = \sum \Delta S \cdot x^2 + \sum \Delta S \cdot y^2 = J_y + J_x$$

$$J_p = J_x + J_y \quad [\text{mm}^4]$$



Obrázek 12 Vzájemný vztah mezi kvadratickým momentem a polárním momentem průřez [6]

### 3.4 Průřezový modul v ohybu

Z kvadratických momentů k osám průřezu počítáme průřezové moduly v ohybu  $W_o$ :

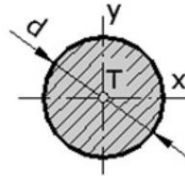
$$W_{ox} = \frac{J_x}{e_x}; \quad W_{oy} = \frac{J_y}{e_y} \quad [\text{mm}^3]$$

Obrázek 13 Průřezový modul v ohybu [6]

Průřezový modul v ohybu  $W_o$  – vypočítáme, jestliže vydělíme kvadratický moment průřezu vzdáleností okrajové vrstvy od neutrální vrstvy (osy), která je vázána na těžiště průřezu.

### 3.5 Kvadratické momenty a průřezové moduly v ohybu jednoduchých ploch

#### 3.5.1 Kruhový průřez



Pro průřez platí vztahy:

$$J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}; \quad J_p = J_x + J_y$$

Obrázek 14 Kruhový průřezový modul v ohybu [6]

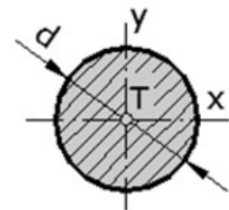
Kvadratické momenty a průřezové moduly v ohybu jednoduchých ploch

Vzhledem k souměrnosti lze psát:

$$J_p = J_x + J_y = 2 \cdot J_x \Rightarrow J_x = \frac{J_p}{2} = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

$$J_x = J_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad [\text{mm}^4]$$

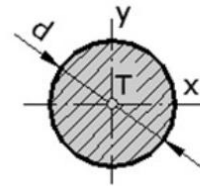
$$e_x = e_y = \frac{d}{2} \quad [\text{mm}]$$



Obrázek 15 Moment setrvačnosti pro kruhový průřez [6]

$$W_{ox} = W_{oy} = W_o = \frac{J_x}{e_x} = \frac{J_y}{e_y} = \frac{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}{\frac{d}{2}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

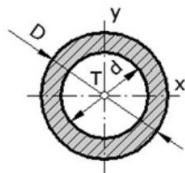
$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [\text{mm}^3]$$



Obrázek 16 Modul průřezu pro kruhový průřez [6]

### Kvadratické momenty a průřezové moduly v ohybu jednoduchých ploch

Mezikruhový průřez. U tohoto průřezu posupujeme obdobně jako u kruhu a můžeme tedy psát:



$$J_x = J_y = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad [\text{mm}^4]$$

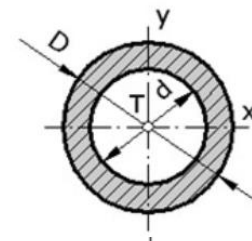
Obrázek 17 Moment setrvačnosti pro mezikruhový průřez [6]

### 3.5.2 Mezikruhový průřez

$$e_x = e_y = \frac{D}{2} \quad [\text{mm}]$$

$$W_{ox} = W_{oy} = W_o = \frac{J_x}{e_x} = \frac{J_y}{e_y} = \frac{\frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)}{\frac{D}{2}} = \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D^4 - d^4}{D} \right)$$

$$W_o = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \quad [\text{mm}^3]$$



Obrázek 18 Mezikruhový průřez [6]

### 3.6 Ohyb

Ohybem rozumíme deformaci tyčí silami kolnými k jejich cílné ose. Z praktického hlediska je flexibilní pohyb velmi důležitým typem deformace. Tyče ohybově namáhané, říkáme jim v této souvislosti nosníky, jsou součástí nejrůznějších konstrukcí. Přesné vyšetření ohybu z pohledu klasické teorie pružnosti je obtížné. Při vyšetřování ohybu se často využívá zjednodušená teorie označená někdy jako technická pružnost. Neexistují žádné nesplněné předpoklady, např. očekávané, že příčný průřez ohýbané křídly rovinným. Takové předpoklady značně rizikového řešení úlohy, posuzování od nesrovnatelně složitějšího přesného řešení bývají zanedbatelné. Ukážeme si, jak vypadá tato zjednodušená teorie vyšetřuje ohyb vetknutého nosníku. [18]

#### Základní pevnostní rovnice pro ohyb

$$\sigma_0 = M_0 / W_0 > \sigma_{D0}$$

$\sigma_0$ ... napětí v ohybu [MPa]

$M_0$ ... ohybový moment [N.m]

$W_0$ ... modul průřezu v ohybu [mm<sup>3</sup>]

$\sigma_{D0}$ ... dovolené napětí v ohybu

### 3.7 Moduly průřezu v ohybu $W_0$

KRUHOVÝ PRŮŘEZ



$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

OBDELNÍKOVÝ PRŮŘEZ

$$W_0 = \frac{h \cdot b^2}{6}$$



ČTVERCOVÝ PRŮŘEZ



$$W_0 = \frac{a^3}{6}$$

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6}$$



TROJÚHELNÍKOVÝ PRŮŘEZ



$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{24}$$

Obrázek 19 Moduly průřezu v ohybu  $W_0$  [5]

Pro výpočet napětí v ohybu a jeho dalších aplikací nevystačíme jen se zatěžující silou  $F$ , ale počítáme s ohybovým momentem, který zatěžuje danou součást. Důležitým faktorem pro výpočet je tvar profilu zatěžující součásti poloha součásti vůči zatěžující síle (momentu) Hodnoty modulu průřezu v ohybu  $W_0$  k předchozím faktorům jsou uvedeny ve strojnických tabulkách. [5]

### 3.8 Mechanické napětí

#### Napětí při osovém tahu

Pokud bychom ve výše uvedeném příkladu pryžové nitě napjali více, po přestřížení by byl pohyb volných konců výraznější. Naopak, pokud bychom stejnou silou napjali hrubší nit, efekt by byl slabší. Nenulové složky normálového napětí lze pak vyjádřit jako skalár vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- $\sigma$  – napětí při namáhání v tahu [Pa]
- $F$  – síla deformující těleso [N]

- $S$  – průřez tělesa kolmý na působící sílu [ $\text{m}^2$ ]

Uvedený vztah však platí pouze jestliže síly působí v jedné přímce a zároveň procházejí osou taženého tělesa, tažené těleso má po celé délce konstantní průřez a velikost napětí je po průřezu rozložena rovnoměrně. V tomto případě se můžeme na systém zjednodušeně podívat jako na jednorozměrný, v němž jsou ostatní složky tenzoru napětí nulové a nenulová je pouze hodnota normálového napětí v ose tělesa. [19]

## Napětí při osovém tlaku

Podobný vztah platí i pro výpočet tlakového napětí, při stlačení tělesa, které je dostatečně silné na to, aby nedošlo při zatížení k jeho vybočení a vzpěru.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- $\sigma$  – napětí při namáhání v tlaku [Pa]
- $F$  – síla deformující těleso [N]
- $S$  – průřez tělesa kolmý na působící sílu [ $\text{m}^2$ ]

Vztah platí za podmíněk, že síly působí v jedné přímce a zároveň procházejí osou stlačeného tělesa, těleso má po celé délce konstantní průřez a velikost napětí je po průřezu rozložena rovnoměrně. [19]

## Napětí při kroucení

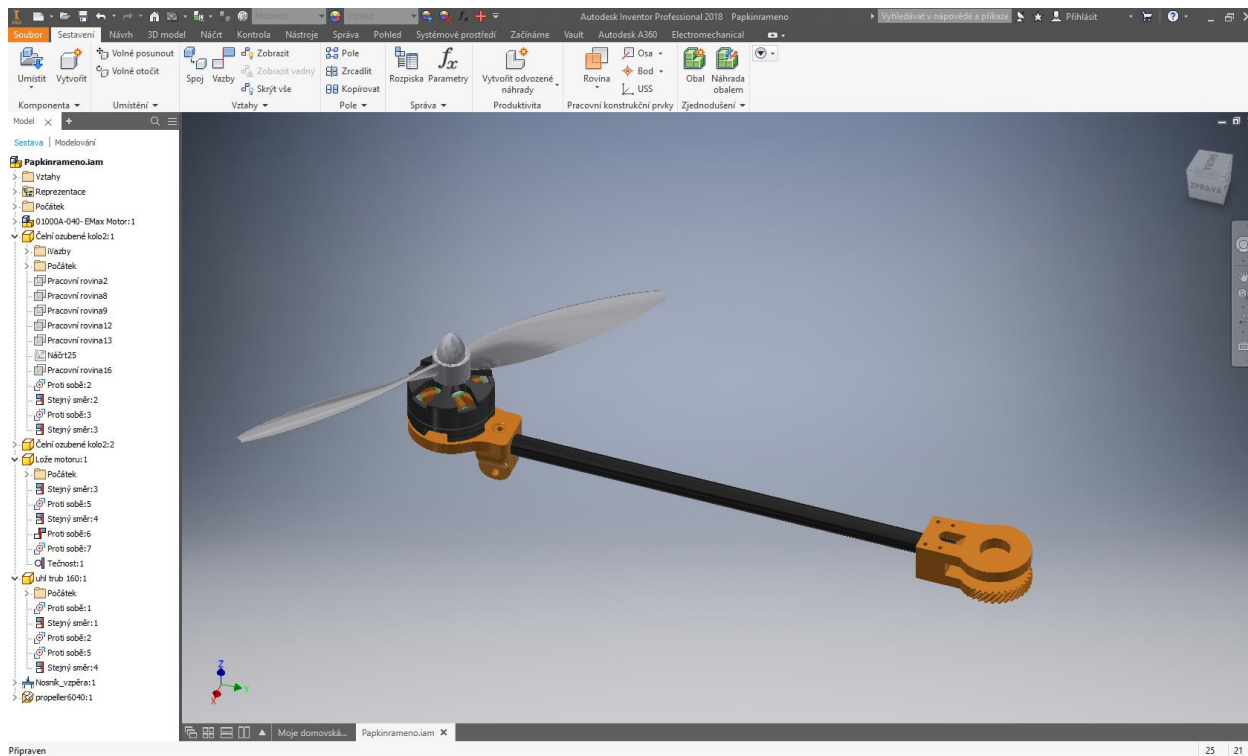
Namáhání v krutu vzniká, pokud na těleso působí moment síly, rovnoběžný s osou tělesa. Při tomto namáhání mají sousední přířezy tělesa snahu navzájem se natočit, okolo společné osy. Velikost maximálního napětí závisí opět na tvaru průřezu kolmého na osu tělesa:

$$\tau_{\max} = \frac{M_k}{W_k}$$

- $T_{\max}$  – maximální napětí při namáhání v kroucení [Pa]
- $M_k$  – točivý moment deformující těleso [Nm]
- $W_k$  – modul průřezu v krutu [ $\text{m}^3$ ] [19]

# 4 Aplikační část a diskuse výsledků

## 4.1 Návrh a konstrukce ramene Trikoptyéry Elektra



Obrázek 20 Rameno Trikoptyéry Elektra (Vlastní)

Rameno Trikoptyéry Elektra bylo vytvořeno v programu Autodesk Inventor 2018. Celková sestava se skládá z osmi součástí a jedné sestavy motorové jednotky. Z knihovny materiálů jsme nadefinovali dva materiály, které jsme podrobili pevnostní zkoušce, a to Carbon fiber reinforced polymer s polyetylentereftalátem. Vrtule je z materiálu ABS, tedy Akrylonitrilbutadienstyren. Abychom mohli sestavu podrobit pevnostní analýze, bylo zapotřebí z uhlíkové trubičky vytvořit nosník s nejméně jednou pevnou vazbou. Vazbu jsme nastavili na stranu s ozubením. V tomto místě bude rameno Trikoptyéry spojeno s trupem, kde je ozubení převedeno pomocí dalších převodů k servopohonu.

## 4.2 Výpočet vetknutého nosníku

Délka řezu... $l=7$  [mm]

Plocha řezu... $S=18,85$  [m<sup>2</sup>]

$$S_1 = \frac{\pi * d_1^2}{4} = \frac{\pi * 7^2}{4} = 38,48 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 19,63 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S = S_1 - S_2 = 38,48 - 19,63 = 18,85 \text{ [m}^2\text{]}$$

Modul průřezu...  $W_x; W_y$ ... 24,91

$$W_x = W_y = \frac{\pi}{32} * \frac{D^4 - d^4}{D}$$

$$W_x = W_y = \frac{\pi}{32} * \frac{7^4 - 5^4}{7}$$

$$W_x = W_y = 24,91$$

Moment setrvačnosti...  $J_x; J_y$ ... 87,18

$$J_x = J_y = \frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4)$$

$$J_x = J_y = \frac{\pi}{64} * (7^4 - 5^4)$$

$$J_x = J_y = 87,179$$

Modul průřezu v krutu...  $W_k$ ... 49,82 jsem vypočítal pomocí webu E-konstrukter.cz [17]

Polární moment průřezu  $J_p$

$$J_p = J_x + J_y$$

$$J_p = 2 * 87,179$$

$$J_p = 174,36$$

Výpočet nosníku na tuhost v krutu:

$$\varphi = \frac{Mk * l}{G * J_p}$$

Krut

$$\rho = \frac{\varphi}{l} = \frac{Mk}{G * J_p}$$



### 4.3 Výpočet sil působících na nosník

Výkon motoru...P... 138 W

Počet článků baterie... 3 článek = 12 V

Vrtule... 6/3

Otáčky motoru s vrtulí 6/3... n... n= 16300 ot/min

Pomocí trojčlenky spočítáme frekvenci, která nám vyjde 271,66 Hz

Úhlová rychlost  $\omega$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2\pi 271,66$$

$$\omega = 1706,93 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Kroutící moment  $M_k$

$$M_k = \frac{P}{2\pi f}$$

$$M_k = \frac{16300}{2\pi * 271,66}$$

$$M_k = 9,55$$

Napětí v krutu  $\tau_K$

$$\tau_K = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{DK}$$

$$\tau_K = \frac{9,55}{49,817}$$

$$\tau_K = 0,19$$

Pro materiál CFRP

Youngův modul = 133 GPa

Modul pružnosti ve smyku = 53 000 MPa

Poissonova konstanta = 0,39

Hustota =  $1,43 \text{ g/cm}^3 = 1430 \text{ kg/ m}^3$

Mez průtažnosti = 300MPa

Pevnost v tahu = 577 MPa

Modul pružnosti ve smyku...G = 5300 MPa

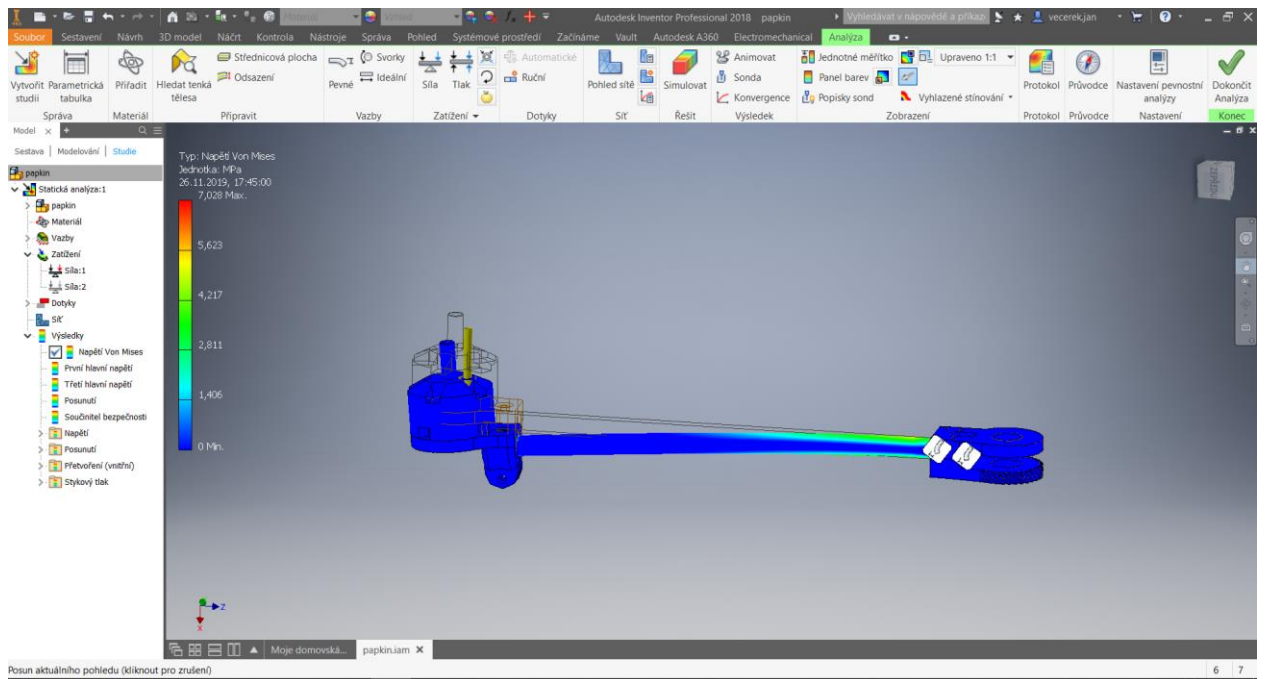
V následujícím kroku si popíšeme výpočet tíhové síly působící na rameno. Součtová hmotnost uhlíkové trubičky, motoru, vrtule a PETG držáku činí 0,03kg. Gravitační zrychlení působící na těleso je  $9,813 \text{ m/s}^2$

$$F_g = m * g$$

$$F_g = 0,03 * 9,813$$

$$F_g = 0,294 \text{ N}$$

Výslednou sílu převedeme na plochu podstavy motoru. Na druhém konci vytvoříme pevnou vazbu a vygenerujeme simulaci.



**Obrázek 21 Rameno podléhá tíhové síle (Vlastní)**

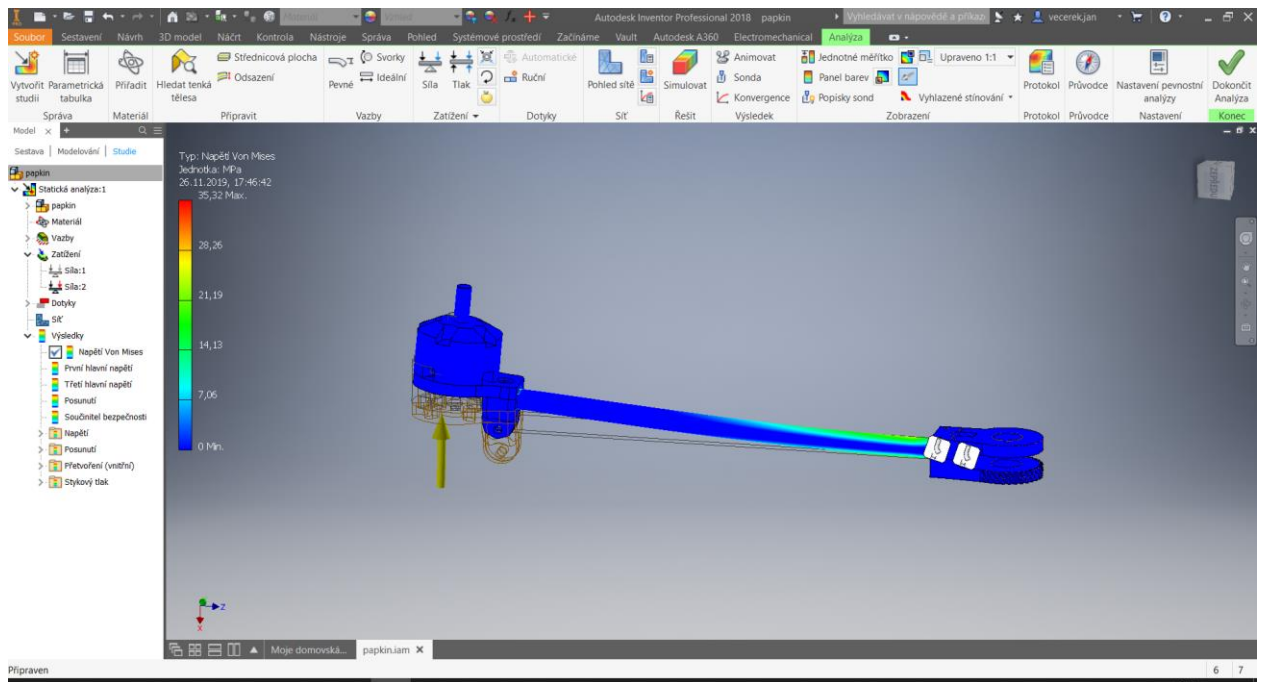
Výpočet síly působící tahem motoru bez tíhové síly.

Díky tabulce poskytnuté od výrobce motoru, rozměru vrtule, známému proudovému zatížení a počtu článků získáváme hodnotu tahu při 100% zatížení motoru. Motor uzdvihne těleso o hmotnosti 0,44kg. Vynásobíme-li tento tah gravitačním zrychlením dostaneme sílu působící na rameno. Síla se rovná síle vztlakové.

$$F_{vz} = m(\text{tah}) * g$$

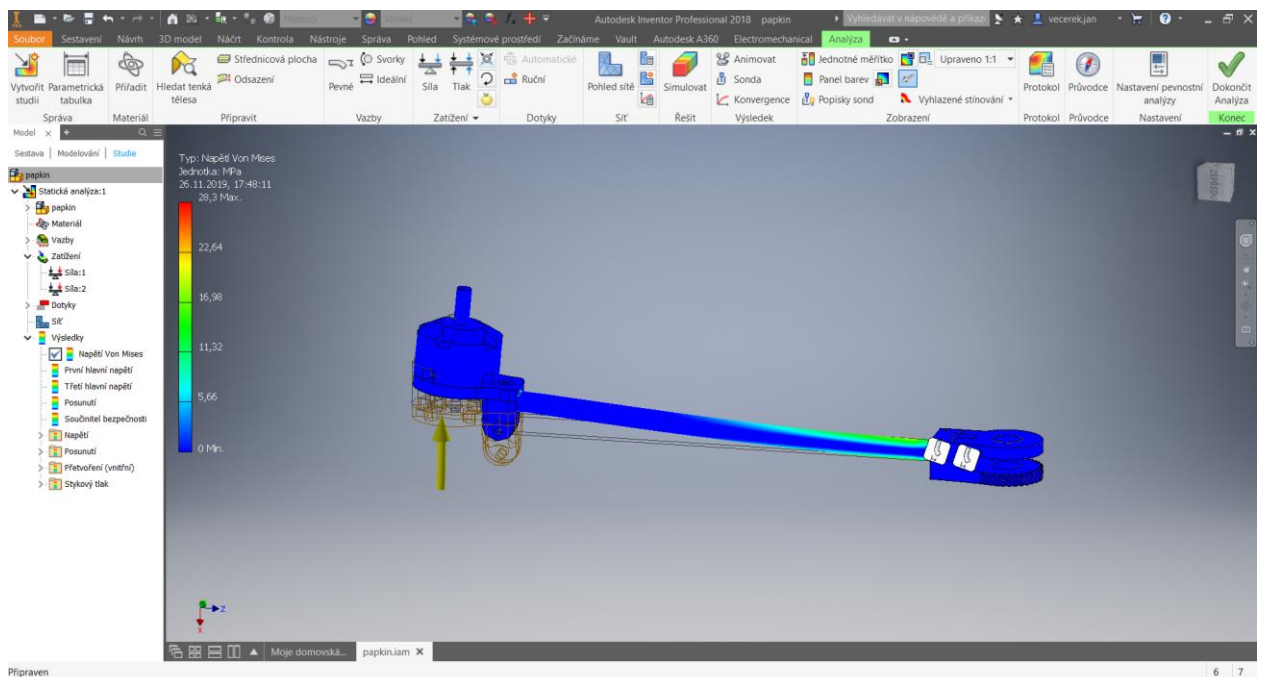
$$F_{vz} = 0,44 * 9,813$$

$$F_{vz} = 4,31772 \text{ N}$$



**Obrázek 22 Rameno podléhá pouze vztahové síle motoru (Vlastní)**

Na obrázku č. 23 jsou nasimulované obě síly  $F_g + F_{vz}$  působící na rameno Trikopty. V reálném modelu budou uhlíkovou trubičkou provlečeny ještě tři vodiče spojující motor s regulátorem.



**Obrázek 23 Spojité výsledné zatížení dvou sil  $F_g$  a  $F_{vz}$  (Vlastní)**

## 4.4 Diskuse výsledků

### Zpráva pevnostní analýzy



Analyzovaný soubor:	papkin.iam
Verze aplikace Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Datum vyhotovení:	26.11.2019, 15:04
Autor studie:	Jan Večerek

#### ☐ Informace o projektu (iVlastnosti)

##### ☐ Fyzické

Hmotnost	0,0300521 kg
Plocha	16388,9 mm <sup>2</sup>
Objem	20398,2 mm <sup>3</sup>
Těžiště	x=-101,325 mm y=43,6102 mm z=-68,8631 mm

#### ☐ Statická analýza:1

##### Obecné cíle a nastavení:

Cíl návrhu	Jediný bod
Typ studie	Statická analýza
Datum poslední úpravy	26.11.2019, 15:03
Zjistit a odstranit režimy tuhého tělesa	Ne
Oddělovat napětí na povrchu dotyků	Ne
Analýza pohybového zatížení	Ne

##### Nastavení sítě:

Prům. velikost prvku (zlomek průměru modelu)	0,1
Min. velikost prvku (zlomek prům. velikosti)	0,2
Součinitel zemních těles	1,5
Max. úhel pootočení	60 deg
Vytvořit zakřivené prvky sítě	Ne
Použít pro síť sestavy měření založená na součástech	Ano

## ☐ Materiály

Název	CFRP	
Obecné	Měrná hmotnost	1,43 g/cm <sup>3</sup>
	Mez kluzu v tahu	300 MPa
	Mez pevnosti v tahu	577 MPa
Napětí	Youngův modul	133 GPa
	Poissonova konstanta	0,39 ul
	Modul pružnosti	47,8417 GPa
Názvy součástí	uhl trub 160	
Název	PET plast	
Obecné	Měrná hmotnost	1,541 g/cm <sup>3</sup>
	Mez kluzu v tahu	54,4 MPa
	Mez pevnosti v tahu	55,1 MPa
Napětí	Youngův modul	27,579 GPa
	Poissonova konstanta	0,417 ul
	Modul pružnosti	9,73149 GPa
Názvy součástí	Lože motoru Čelní ozubené kolo2 Čelní ozubené kolo2	

## ☐ Provozní podmínky

### ☐ Síla:1

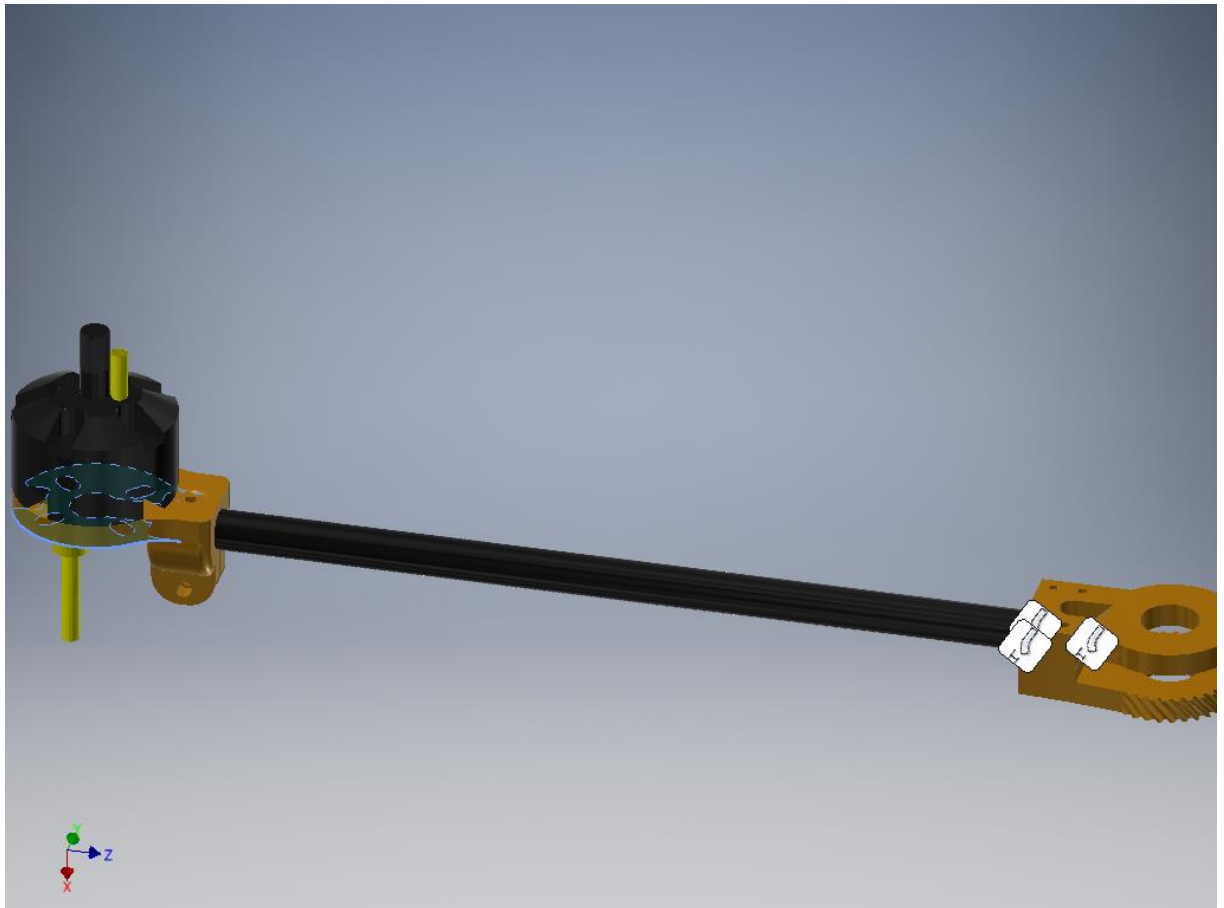
Typ zatížení	Síla
Velikost	0,940 N
Vektor X	0,940 N
Vektor Y	0,000 N
Vektor Z	0,000 N

### ☐ Vybrané plochy

### ☐ Síla:2

Typ zatížení	Síla
Velikost	4,430 N
Vektor X	-4,430 N
Vektor Y	0,000 N
Vektor Z	-0,000 N

### ☐ Vybrané plochy



Obrázek 24 Síly působící na plochu ramene (Vlastní)

## ☐ ☐ Výsledky

### ☐ Reakční síla a moment na vazbách

Název vazby	Reakční síla		Reakční moment	
	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)	Velikost	Komponenta (X,Y,Z)
Pevná vazba:1	3,49 N	3,49 N	0,462374 N m	-0,00967831 N m
		0 N		-0,462273 N m
		0 N		0 N m

### ☐ Souhrn výsledků

Název	Minimální	Maximální
Objem	20398 mm <sup>3</sup>	
Hmotnost	0,0300517 kg	
Napětí Von Mises	0,00000564833 MPa	27,9204 MPa
První hlavní napětí	-5,98813 MPa	24,5833 MPa
Třetí hlavní napětí	-23,9094 MPa	5,86286 MPa
Posunutí	0 mm	0,382032 mm
Součinitel bezpečnosti	3,66396 ul	15 ul
Napětí XX	-7,52321 MPa	8,69265 MPa
Napětí XY	-2,19674 MPa	3,28075 MPa

Napětí XZ	-6,49018 MPa	13,427 MPa
Napětí YY	-8,52019 MPa	8,4903 MPa
Napětí YZ	-11,4362 MPa	13,6123 MPa
Napětí ZZ	-23,172 MPa	23,6697 MPa
Posunutí X	-0,377836 mm	0,0000430181 mm
Posunutí Y	-0,0000867617 mm	0,00514154 mm
Posunutí Z	-0,0375222 mm	0,100841 mm
Ekvivalentní přetvoření (vnitřní)	0,000000000194651 ul	0,000924207 ul
První hlavní přetvoření (vnitřní)	-0,0000000773807 ul	0,000555448 ul
Třetí hlavní přetvoření (vnitřní)	-0,00110844 ul	0,00000000244939 ul
Přetvoření XX (vnitřní)	-0,000223001 ul	0,000255345 ul
Přetvoření XY (vnitřní)	-0,0000807379 ul	0,0000744312 ul
Přetvoření XZ (vnitřní)	-0,000499779 ul	0,00032582 ul
Přetvoření YY (vnitřní)	-0,000100872 ul	0,0000828809 ul
Přetvoření YZ (vnitřní)	-0,00028917 ul	0,000328232 ul
Přetvoření ZZ (vnitřní)	-0,000883164 ul	0,000356354 ul
Stykový tlak	0 MPa	42,5833 MPa
Stykový tlak X	-6,65046 MPa	6,75613 MPa
Stykový tlak Y	-6,00407 MPa	9,21296 MPa
Stykový tlak Z	-32,0878 MPa	41,9293 MPa



## 5 Závěr

Rameno Trikoptyéry Elektra jsme vymodelovali v programu Autodesk Inventor Professional 2018. V knihovně materiálů Inventoru jsme sestavě přiřadili vlastnosti materiálů PET a CFRP. Provedli jsme potřebné výpočty k nasimulování vetknutého nosníku s pevnou vazbou. Na nosník jsme nechali působit sílu tíhovou i vztlakovou, kterou jsme vypočetli z maximálního tahu motoru.

Výsledná simulace a zpráva z pevnostní analýzy provedená v Inventoru nám dokázala, že použité materiály v naší sestavě vydrží síly i tlaky působící na rameno Trikoptyéry Elektra.

Rameno je tedy vyhovující pro naše účely a jeho funkčnost bude nadále testována v provozu.

# Seznam zdrojů

- [1] <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/801-prusament-petg-prusa-orange-1kg.html>
- [2] [https://hobbyking.com/en\\_us/gemfan-propeller-6x4-5-black-cw-ccw-2pcs.html](https://hobbyking.com/en_us/gemfan-propeller-6x4-5-black-cw-ccw-2pcs.html)
- [3] [https://www.banggood.com/Emax-MT2204-2300KV-Brushless-Motor-For-QAV-250-p-946400.html?utmid=2944&ref=cityads&prx=1gCZ1QyavTZvCTi&aip=5dRy&click\\_id=1gCZ1QyavTZvCTi&ID=49006&cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/Emax-MT2204-2300KV-Brushless-Motor-For-QAV-250-p-946400.html?utmid=2944&ref=cityads&prx=1gCZ1QyavTZvCTi&aip=5dRy&click_id=1gCZ1QyavTZvCTi&ID=49006&cur_warehouse=CN)
- [4] <https://www.morkxsmenszone.com/product/pla-abs-flexible-petg-3d-printer-filament-1-75mm-1kg-0-8kg-plastic-filament-material-for-createbot-makerbot-reprap-high-quality/?v=928568b84963>
- [5] <https://slideplayer.cz/slide/3064605/>
- [6] <https://slideplayer.cz/slide/4874823/>
- [7] <https://www.peckamodel.cz/2250012-regulator-bl-heli-serie-12a>
- [8] [http://www.vss-plasty.cz/?page\\_id=273](http://www.vss-plasty.cz/?page_id=273)
- [9] <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [10] [http://www.airspace.cz/akademie\\_lectvi/media/2013/07/02-Schema-pohyb%C5%AF-vrtule-za-letu.jpg](http://www.airspace.cz/akademie_lectvi/media/2013/07/02-Schema-pohyb%C5%AF-vrtule-za-letu.jpg)
- [12] <https://emotors.cz/cs/emax/5485-emax-mt1806-2280kv-cw.html>
- [13] <https://www.peckamodel.cz/2250012-regulator-bl-heli-serie-12a>
- [14] <http://www.hybrid.cz/cfrp>
- [15] [https://www.airspace.cz/akademie\\_lectvi/2012/03/co-by-se-mohlo-ale-spise-melovedet-o-vrtulich/](https://www.airspace.cz/akademie_lectvi/2012/03/co-by-se-mohlo-ale-spise-melovedet-o-vrtulich/)
- [16] [http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY\\_32\\_INOVACE\\_11-10.pdf](http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_11-10.pdf)
- [17] <https://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty/14-kvadraticky-moment-a-modul-prurezu-v-ohybu/99-kvadraticky-moment-prurezu-modul-prurezu-v-ohybu-mezikruzi>
- [18] [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/3\\_5](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/3_5)
- [19] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A9\\_nap%C4%9Bt%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A9_nap%C4%9Bt%C3%AD)

# Seznam použitých zkratek

ABS - Akrylonitrilbutadienstyren

CFRP – Carbon fiber reinforced polymer

PET - Polyethyltereftalát

PETG - Polyethyltereftalát glykol

# Seznam tabulek popř. obrázků

## Obrázky:

Obrázek 25 Uhlíková trubička (Vlastní)

Obrázek 26 Parametry CFRP definované v programu Autodesk Inventor Professional 2018 (Vlastní)

Obrázek 27 Filament PETG Průša [1]

Obrázek 28 Parametry PETG [4]

Obrázek 29 Parametry PETG definované v programu Autodesk Inventor Professional 2018 (Vlastní)

Obrázek 30 Vytvořené součásti z PETG (Vlastní)

Obrázek 31 Schéma pohybů vrtule za letu [10]

Obrázek 32 Vrtule 6/3 pro Trikoptéru Elektra (Vlastní)

Obrázek 33 Motor EMAX MT2204 2300KV [3]

Obrázek 34 Motor EMAX zpracovaný v programu Autodesk Inventor 2018 (vlastní)

Obrázek 35 Kvadratický moment průřezu [6]

Obrázek 36 Vzájemný vztah mezi kvadratickým momentem a polárním momentem průřez [6]

Obrázek 37 Průřezový modul v ohybu [6]

Obrázek 38 Kruhový průřezový modul v ohybu [6]

Obrázek 39 Moment setrvačnosti pro kruhový průřez [6]

Obrázek 40 Modul průřezu pro kruhový průřez [6]

Obrázek 41 Moment setrvačnosti pro mezikruhový průřez [6]

Obrázek 42 Mezikruhový průřez [6]

Obrázek 43 Moduly průřezu v ohybu  $W_0$  [5]

Obrázek 44 Rameno Trikoptéry Elektra (Vlastní)

Obrázek 45 Rameno podléhá tíhové síle (Vlastní)

Obrázek 46 Rameno podléhá pouze vztlakové síle motoru (Vlastní)

Obrázek 47 Spojité výsledné zatížení dvou sil  $F_g$  a  $F_vz$  (Vlastní)

Obrázek 48 Síly působící na plochu ramene (Vlastní)

## Tabulky:

Tabulka 1 Carbon Fiber Reinforced polymer vlastnosti [8]

Tabulka 2 Vlastnosti filamentu PETG [9]

Tabulka 3 Parametry motoru [12]