



Střední průmyslová škola strojní  
a elektrotechnická a Vyšší odborná škola,  
Liberec 1, Masarykova 3

## DLOUHODOBÁ MATURITNÍ PRÁCE

MECHANIKA MODELU „TRIKOPTÉRA“  
POMOCÍ MODERNÍCH MATERIÁLŮ

Autor	<b>Tomáš Valenta</b>
Obor	<b>Strojírenství</b>
Vedoucí práce	<b>Tomáš Kazda, Bc., DiS.</b>
Školní rok	<b>2010/2011</b>



Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola, Liberec 1,  
Masarykova 3

## Zadání dlouhodobé maturitní práce

Téma práce:

Cílem práce je návrh a výroba prototypu trojramenné mechaniky pro model trikoptéry. Návrh by měl být vytvořen s ohledem na pevnost, nízkou hmotnost a relativně nízké finanční náklady. Použitým materiálem má být jakýkoliv jiný materiál než-li duralová slitiny. Mechanika musí být jednoduše přepravitelná (skládací a snadno demontovatelná), musí obsahovat nosné plochy elektroniky a kyvné rameno pro její ovládání. Předpokládané užitečné zatížení je 1 kg, celková hmotnost do 3 kg, hmotnost draku pod 500 g, roztečný průměr os rotorů cca 65 cm.

Cíl práce:

1. Rozbor a vola použitých materiálů
2. Návrh a konstrukce mechaniky
3. Pevnostní výpočty zvolené konstrukce
4. Výkresová dokumentace
5. Výroba mechanických částí modelu a jejich sestavení

## **Anotace (Resumé)**

Práce se zabývá popisem trikoptéry, analýzou a vyhodnocením jichž existujících modelů trikoptér, rozborem zvolených použitých materiálů, konstrukcí a tvarů pevných částí modelů a návržení mechaniky náklonu rotorů. Vychází z konkrétního zadavatelem předloženého modelu. Přínosem by měla být nově zpracovaná konstrukce kostry modelu.

## **Summary**

This work deals with the description of a tricopter, analysis and evaluation of already existing models of tricopters, it also deals with an analysis of selected materials, structures and shapes of solid parts of the models and a design of the tilt rotor mechanics. The work is based on the actual model presented by the taskmaster. The contribution of this work should be a newly processed construction of a model frame.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou dlouhodobou maturitní práci vypracoval(a) sám(a) a uvedl jsem veškerou použitou literaturu a bibliografické citace.

V Liberci dne 11.5.2011

.....  
Tomáš Valenta

## Poděkování

Tímto děkuji panu Tomášovi Kazdovi, Bc., DiS. za vedení mé dlouhodobé maturitní práce a rady při jejím vypracování, panu Ing. Radkovi Havlíkovi za konzultace a cenné připomínky, panu Jaromírovi Kubíčkoví a panu Zdeňkovi Šubrovi za výpomoc a cenné rady při výrobě a panu Ing. Jaroslavovi Semerádovi za ochotu při obstarávání materiálu.

## Osnova

1. Všeobecná část:
  - a. Popis trikopty
  - b. Analýza již vytvořených modelů trikopty
  - c. Rozbor a volba používaných materiálů
2. Řešení zadání:
  - a. Návrh pevných částí kostry modelu a volba jejich materiálů
  - b. Návrh kyvných mechanismů
  - c. Pevností výpočty zvolených profilů
  - d. Výkresová dokumentace kostry modelu
  - e. Výrobní postupy pro jednotlivé díly
  - f. Rozbor neúspěšných řešení a hledání jejich příčin
  - g. Závěry a doporučení
3. Praktická část:
  - a. Výroba mechanických částí modelu
  - b. Sestavení kostry modelu

## Obsah

Úvod.....	1
1 Analýza již vytvořených modelů trikoptér.....	2
1.1 Co je to „Tricopter“ .....	2
1.2 Analýza již vytvořených modelů.....	3
1.3 Rozbor a volba používaných materiálů.....	5
1.3.1 Uhlíkové kompozity.....	5
1.3.2 Dřevo.....	5
1.3.3 Hliníkové slitiny.....	5
1.3.4 Laminátové desky a profily.....	5
1.3.5 Plasty.....	5
1.3.6 Mechanické vlastnosti.....	6
2 Návrh pevných částí kostry modelu a volba jejich materiálu.....	7
2.1 Materiály použité pro kostru .....	7
2.2 Návrh pevných částí kostry modelu .....	8
2.3 Návrh kyvného mechanismu rotoru.....	9
2.3.1 Analýza používaných typů náklonu .....	9
2.3.2 Vlastní řešení.....	10
3 Pevnostní výpočty.....	13
3.1 Pevnostní výpočet ramene.....	13
3.1.1 Výpočet průměru z pevnostní podmínky na ohyb.....	13
3.1.2 Výpočet průměru z průhybu ramene.....	15
3.1.3 Výpočty napětí a průhybu pomocí Metody konečných prvků.....	18
4 Neúspěšná řešení a doporučení.....	27
Závěr.....	28
Seznam použitých zdrojů .....	29
A. Výrobní výkresy.....	31
B. Výrobní postupy .....	32
C. Obsah přiloženého CD.....	33



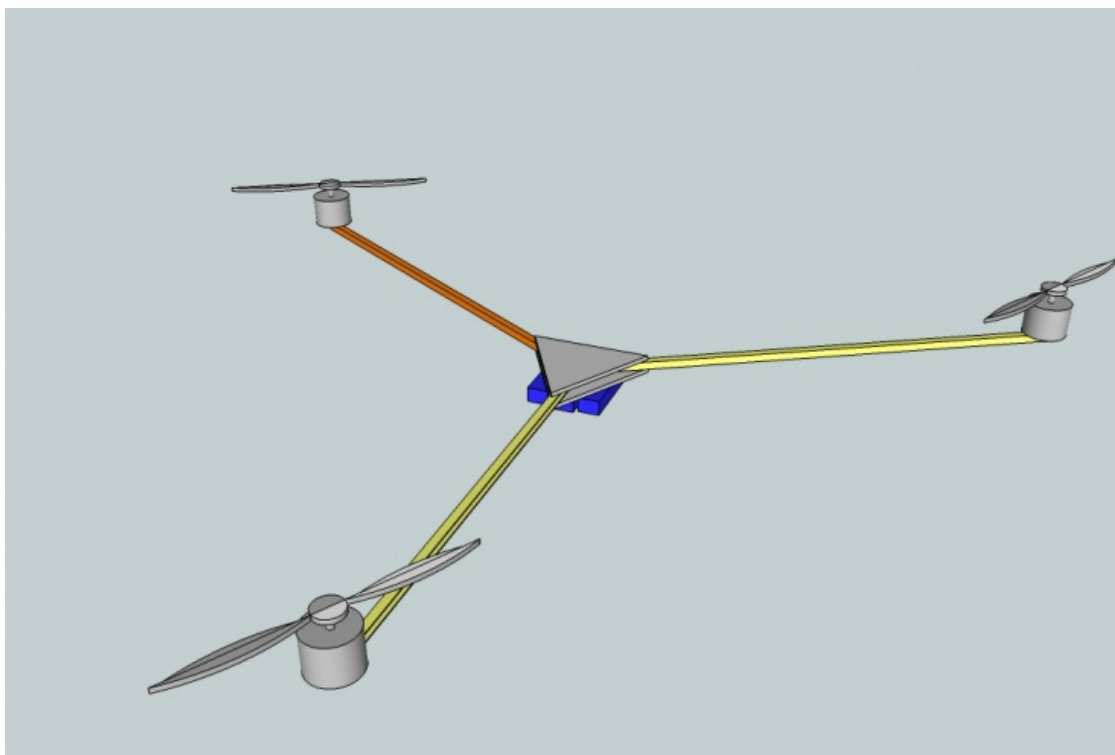
## Úvod

Práce se zabývá konstrukčním návrhem kostry pro Trikoptéru. V této práci je popsán postup, jak vznikla výsledná kostra. Nejprve pojednává o už postavených konstrukcích a následně na základě výpočtů a analýz je navržena vlastní konstrukce. Trikoptéra je bez-pilotový letoun se třemi svisle uloženými rotory. Na stavbu kostry budou použity moderní konstrukční materiály jako například uhlíkový kompozit. Princip řízení trikoptéry je podobný jako u vrtulníku. Je zde rozdíl v tom, že trikoptéra má tři svisle uložené rotory, u kterých jsme schopni nezávisle na sobě měnit jejich otáčky a tím i tahové síly motorů. Jelikož nebudou použity proti běžné vrtule, je potřeba osadit jeden rotor možností náklonu pro kompenzaci točivého momentu. Pevnost trikoptéry bude zkontrolována ručními výpočty, ale i moderními sofistikovanými výpočty pomocí Metody konečných prvků. Práce slouží pro možnou výrobu kostry, neboť obsahuje výrobní postupy a výrobní výkresy a objasňuje problematiku týkající se volbou materiálů a mechanismů samotné kostry.

# 1 Analýza již vytvořených modelů trikoptér

## 1.1 Co je to „Tricopter“

Trikoptéra (ang. Tricopter) je zařízením určené k vzletu a létání na podobném principu jako vrtulník. Má tři svisle uložené rotory, kde každý rotor je připojen přímo na elektromotor a jsou umístěny na rameni. Počet ramen je stejný jako rotorů a jsou centrálně spojeny tak, že osy rotorů tvoří kružnici a ramena směřují do středu této kružnice. Jsou uložena po  $120^\circ$ . Základní tvar je na *obr. 1* [1].



obr. 1

Princip letu trikoptéry je založen na ovládní každého motoru a tím i vrtule zvlášť. Roztočením vrtulí vzniká pod lopatkami vztlak, který udává sílu potřebnou ke vzletu. Je potřeba, aby dvě přední vrtule se točily v opačném smyslu otáčení, nejlépe směrem ke středu. Tím se kompenzuje rotační moment. U vrtulníků tuto funkci zastává ocasní rotor.

Pro pohyb trikoptéry v před musí dojít ke změně otáček motorů tak, aby ocasní vrtule se točila více jak dvě přední vrtule. Hodnotu a poměr otáček udává program v řídicí elektronice.

Dále pro otáčení kolem svislé osy (vertikály) je zapotřebí osadit zadní rotor kyvným mechanismem, který umožní kolem vodorovné osy (horizontály) naklápění rotoru.

Jako nejlepší využití trikopty je špionážní bez-pilotový vrtulník, protože trikopty lze po designové úpravě osadit kamerou a dalším sledovacím zařízením, popřípadě zvedákem pro lehká břemena.

## 1.2 Analýza již vytvořených modelů

Trikopty se pokoušelo a pokouší zhotovit spousta nadšenců, modelářů a konstruktérů. Tím je možné provést určitou analýzu již vytvořených modelů. Každý funguje na stejném principu, liší se jen konstrukcí a elektronikou.

Materiálům se meze nekladou a jako nejpoužívanější se vyskytovaly dřevěné, hliníkové, uhlíkové, laminátové a plastové konstrukce.

Elektronika se liší typem řízení a následně jeho programováním. Řízení trikopty je problematika jiného než strojírenského oboru, takže elektronika není předmětem návrhu v mé práci.

Jako doporučenou předlohou mi sloužila trikopty na *obr. 2* [2], která má ramena vyrobená z dřevěné překližky. Ty jsou ukotvena mezi dvě laminátové desky. Motory jsou také uloženy na laminátových destičkách. Otáčení trikopty zajišťuje náklon jednoho z rotorů. Veškerá elektronika je na kostře uložena co nejbližší ke středu otáčení.



obr. 2

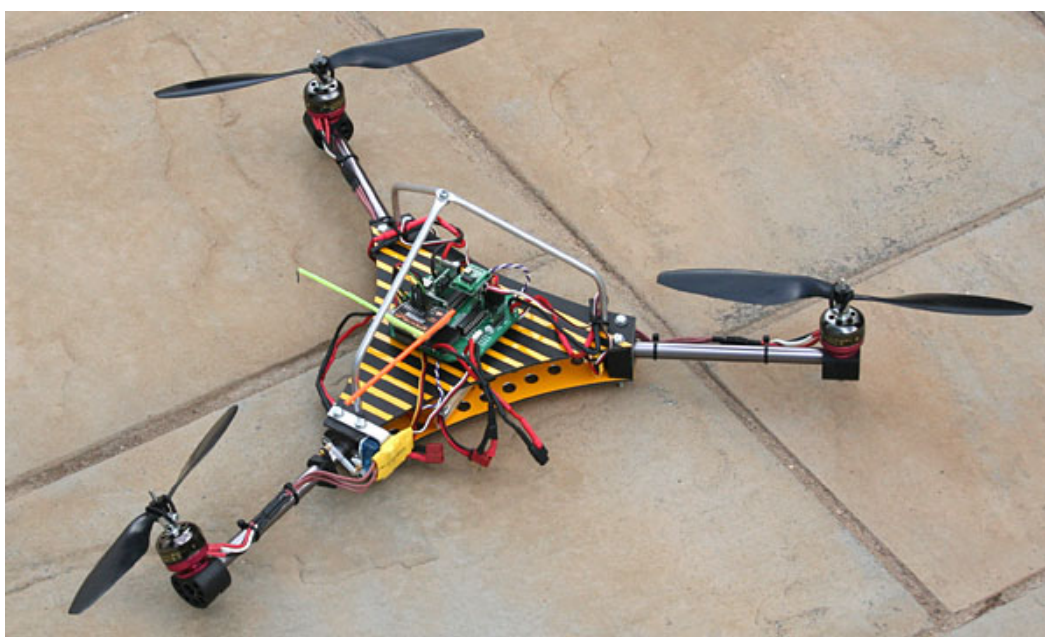
Další zajímavou konstrukcí má trikopty na *obr. 3* [3], která má základní stavební prvky vyrobené z uhlíkových profilů (karbonových, kompozitních, ang. carbon profiles).

Otáčení trikoptéry zajišťuje náklon jednoho z rotorů. Veškerá elektronika je uložena ke středu otáčení. Zajímavostí zde je, že kabely od motorů jsou vedeny rameny, což umožňuje kruhový dutý profil těchto ramen.



obr. 3

Poslední analyzovanou konstrukcí je trikoptéra na *obr. 4* [4], která má ramena vyrobená z hliníkových trubek. Elektronika je usazena ke středu otáčení a střed je vyroben z laminátových nebo plastových desek (z obrázku není zřejmé). Zajímavostí zde je, že ramena nekončí poblíž středu otáčení, ale jsou ukotvena mezi dvě desky poměrně dále od středu otáčení. Proto je kostra zpevněna profilovanými trubičkami, které také chrání elektroniku.



obr. 4

### 1.3 Rozbor a volba používaných materiálů

U výše uvedených trikoptér byly použity materiály jako je dřevo, uhlíkové kompozity, hliníkové slitiny, laminát a plast. Tyto materiály se vyznačují malou hmotností a uhlíkové kompozity a lamináty také výbornou tuhostí a pevností.

#### 1.3.1 Uhlíkové kompozity

Základní složkou (prvkem) pro uhlíkový profil je uhlík (chemická značka „C“). Z něho jsou vyrobena vlákna, ze kterých se vyrábí výztuž a jsou spojena pojivem tzv. maticí, ta má různé podoby. Uhlíkové profily jsou mnohonásobně lehčí než ocel a mechanické vlastnosti jsou srovnatelné i lepší (záleží na druhu zpracování vláken) - jsou ale výrazně křehčí.

#### 1.3.2 Dřevo

Dřevěné profily pro modelářské účely jsou nejčastěji z balsy a překližky. Balsa je velice lehké, ale málo pevné dřevo. Překližkové profily jsou vyrobené z více vrstveného profilu, který je tvořen loupaných nebo krájených dých a ty jsou na sebe lepeny kolmo ve směru vláken [5].

#### 1.3.3 Hliníkové slitiny

Nejčastěji používanou slitinou je duralová slitina. Základním prvkem je hliník a měď, dále zde jsou další legující prvky jako např. hořčík, mangan, zinek atd. Dural se vyznačuje svou dobrou obrobiteľností a pevností vůči své hustotě 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Využití dalších slitin hliníku pro účel stavby trikoptéry je zanedbatelné.

#### 1.3.4 Laminátové desky a profily

Je to druh kompozitního materiálu, který tvoří několik vrstev. Základními složkami pro laminát je vždy kompozit a pojivo. Kompozitní složkou je nejčastěji skelný a uhlíkový kompozit, dále také karbidy křemíku, čedičových a borových vláken. Jako pojivo se používá pryskyřice nebo vhodné lepidlo [6].

#### 1.3.5 Plasty

Vzhledem k počtu druhů plastů a jejich rozsáhlému použití, je nad rámec mé práce je zde konkrétně specifikovat. Pro strojírenství a konstrukci je nejpoužívanější polyamid 6 a polyamid 66. Je velice lehký a značně pevný. Jeho výhodou je i masová výroba a tím i cenová dostupnost

**1.3.6 Mechanické vlastnosti**

Měřená veličina	Ocel	Uhlíkové kompozity	Dřevo	Hlíník	Skelný laminát	Pyloamid 66
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	1650	520	2700	2100	1140
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	400-1500	1400-2500	150	180	1000-1400	nezjištěno
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	190-210	120-300	10	70	45-46	nezjistěno
Mez pevnosti v tahu [MPa]	300-1500	1400	100	180	1000-1400	77-84
Modul pružnosti v tahu [GPa]	190-210	140	9	70	45	1,2-2

[7][8][9]

## 2 Návrh pevných částí kostry modelu a volba jejich materiálu

### 2.1 Materiály použité pro kostru

Pro kostru tikoptéry jsem zvolil uhlíkové profily, hliníkové duralové slitiny, plasty a kompozitní panel NEOBOND. NEOBOND je stavební materiál používaný pro zakrývání fasád u moderních staveb. Je tvořen z polyethylenového (PE) nebo minerálního (FR) jádra a dvou hliníkových plechů o síle 0,21 mm, 0,3 mm nebo 0,5 mm. Jeho hlavními vlastnostmi je nižší hmotnost, akustická izolace, pevnost a tuhost [10]. Tento materiál nahrazuje sklolaminátové desky, nebo desky z polyamidu 66 se skelnými vlákny. Důvodem jeho volby pro můj model, byla jeho lepší dostupnost.

Mechanické vlastnosti NEOBONDu:

Měřená veličina	Hodnota
Plošná hmotnost [kg/m <sup>2</sup> ]	3,86
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	114
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	260
Mez pevnosti v tahu [MPa]	30,1

Pro plastové součásti byl vybrán plast s označením PA6G natural, nebo-li Nylatron (Nylon 6). Je to litý nylon třídy polyamid 6.

Mechanické vlastnosti:

Měřená veličina	Hodnota
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1150
Mez pevnosti v tahu [MPa]	85
Modul pružnosti v tahu [MPa]	3300
Koeficient smykového tření [-]	0,4

[11]

Pozn.: orientační mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu a hliníkové duralové slitiny jsou uvedeny v kapitole 1.3.1 nahoře a 1.3.3 nahoře.

## 2.2 Návrh pevných částí kostry modelu

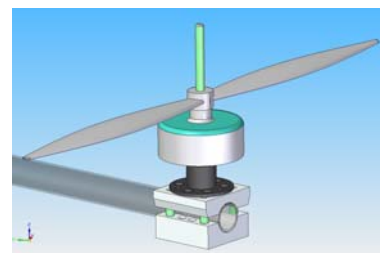
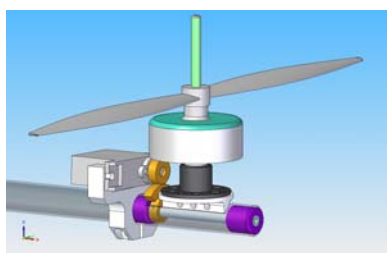
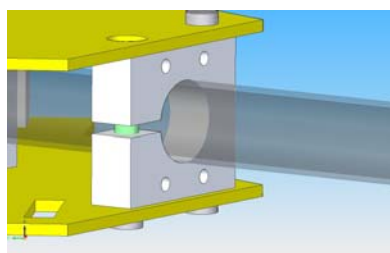
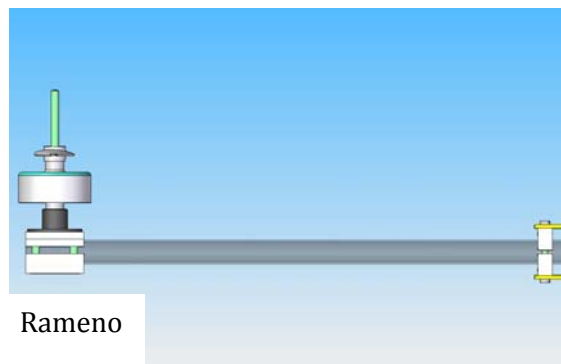
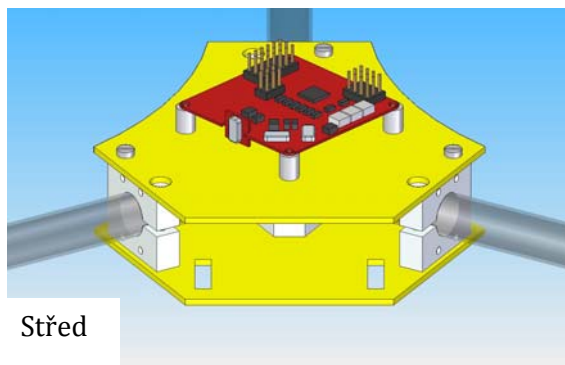
Kostra trikoptéry jako celek se skládá z několika základních částí:

- Střed trikoptéry
- Ramena
- Uložení rotorů.

Střed trikoptéry slouží jako nosná plocha a zároveň kotevní část pro uchycení ramen. Je navržena ze dvou protilehlých desek NEOBOND, mezi které se připevní uchycení ramen. Horní deska je zároveň určena pro připevnění řídicí elektroniky a na spodní desku se připevní baterie.

Ramena trikoptéry jsou zvolena z tenkostěnného kruhového profilu z uhlíkového kompozitu. Pomocí svěrného členu z hliníkové duralové slitiny, který je připevněn mezi desky NEOBOND, jsou všechna tři ramena upevněna se středem. Na konci dvou ramen jsou dělené svěrné členy, které nesou elektromotory s vrtulemi (rotor). U jednoho ramene je na konci kyvný mechanismus pro náklon jeho rotoru.

Uložení vrtulí je řešeno na přímo, tj. vrtule je přímo uchycená na hřídel elektromotoru – není zde mechanický převod. Elektromotor je připevněn na výše zmíněném děleném svěrném členu z hliníkové duralové slitiny. Rotor, který se naklápí je připevněn na plastové součásti z PA6G natural.



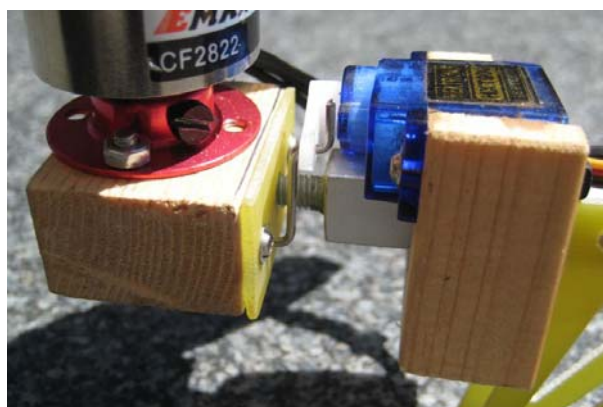
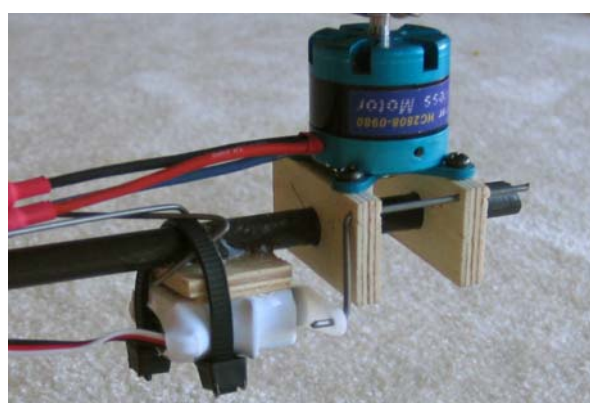
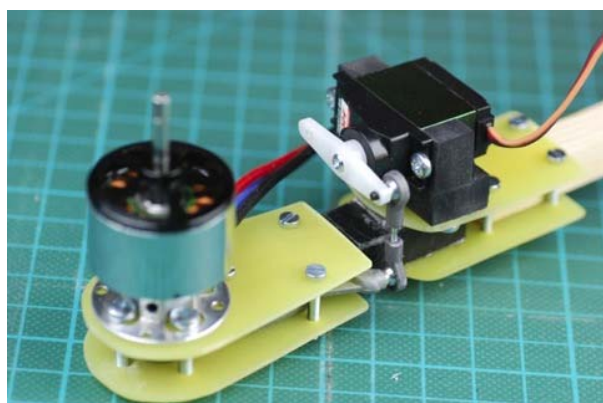


## 2.3 Návrh kyvného mechanismu rotoru

Náklon jednoho rotoru umožňuje trikoptéře konat rotační pohyb kolem svislé osy. Ovládání je řízeno servomotorem, který dostává signály z řídicí elektroniky. Náklon tohoto rotoru musí být řešen tak, aby měl co nejvyšší citlivost. Proto celý mechanismus musí být vyroben velice přesně a musí být dostatečně tuhý.

### 2.3.1 Analýza používaných typů náklonu

Nejčastějším mechanismem je pákový převod viz. obrázky níže. Na hřídel servomotoru je připevněn pákový mechanismus tvořený ze dvou klik a jedné ojnice. Uložení kliky na ojnici je řešeno přesným kloubem. U tohoto typu mechanismu je potřeba velmi citlivý servomotor, protože měnit převod mezi úhlovým natočením hřídele servomotoru a úhlovým natočením rotoru je obtížné. Jeho složitost na výrobu je velká a školní dílny nejsou vybaveny natolik, aby bylo možno mechanismus vyrobit.



### 2.3.2 Vlastní řešení

Pákový mechanismus, jelikož nejde vyrobit ve školních dílnách, by se musel koupit, což není v souladu se zadáním práce. Přitom náklon rotoru je nejpodstatnější mechanikou kostry.

Další možnosti řešení pohybu náklonu je lineární servomotor. Jeho výroba je náročná a opět by se jednalo o jeho nákup. Jako mé další navržené řešení byl navržen pohyb pomocí ozubených kol. Tento mechanismus není složitý a je vyrobitelný ve školních dílnách. Jeho výhodou je velký rozsah poměru mezi úhlovým natočením hřídele servomotoru a úhlovým natočením rotoru. Jelikož se jedná o vlastnoručně vyrobený prvek, mohu volbou materiálu ovlivnit vlastnosti ozubených kol.

Pohon náklonu rotoru bude tedy udávat servomotor a bude přenášen pomocí ozubených kol. Rotor je přes speciálně vyrobenou podložku z materiálu PA6G Natural upevněn na hřídeli, který je usazen do dvou kluzných ložisek. Řešení, kde se používají dvě ložiska je uplatňován v menším množství než náklon s jedním ložiskem. Z výše analyzovaných náklonů toto využívá pouze jeden. Kluzné ložisko je vyrobené z plastu, který obsahuje grafit. To se využívá k samo-mazání ložiska, tedy velice vhodné pro kluzná ložiska. Hřídel je vyroben z konstrukční nelegované oceli a je axiálně zajištěn tak, že na hřídeli je vysoustružen nákrůžek, který se opře o ložisko a na druhé straně ložiska je šroub, který je dotažen na čelo hřídele. Pro tento způsob zajištění musí být dodrženo, aby ložisko bylo o 0,02 mm až 0,05 mm kratší, než vzdálenost čela hřídele od čela nákrůžku. Tím se zajistí volný chod a malá vůle.

Aby se zvýšila citlivost samotného náklonu, je zvolen převod mezi ozubenými koly po konzultaci s vedoucím práce 1:2. Modul ozubených kol, je zvolen podle možností výroby ve školních dílnách a to tak, aby byl mezi 0,5 až 1. V dílnách je k dispozici kotoučová modulová fréza pro modul 0,8, tím je dán modul ozubených kol. Počet zubů je zvolen podle rozsahu osových vzdáleností

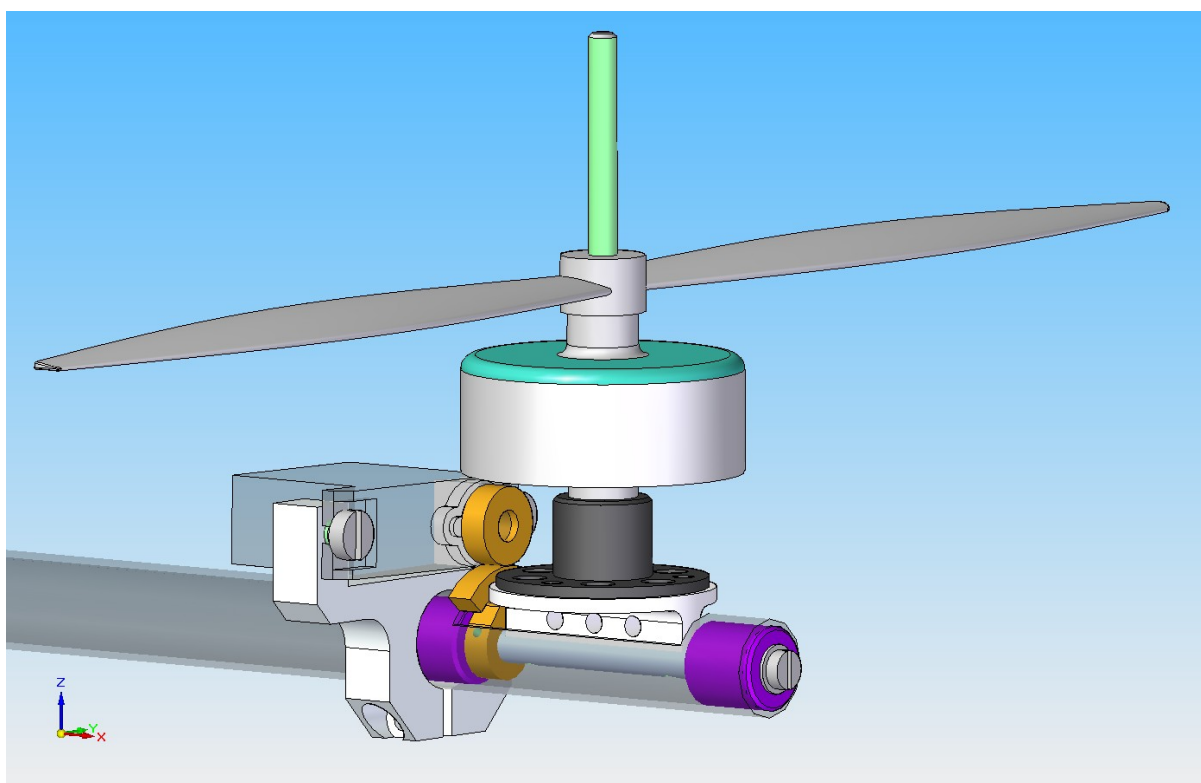


ozubených kol. To je dáno osou ramene náklonu a konstrukčním řešením uložení servomotoru. Výsledný počet zubů je zvolen tak, že pro pastorek z teoretického minimálního počtu zubů a to 14 a pro ozubené kolo na hřídeli náklonu 28 zubů. Vypočtená osová vzdálenost je v rozsahu možných uložení.

Ozubené kolo se 28 zuby musí mít speciální tvar, protože vzhledem ke svému průměru je větší než vnitřní průměr ramene náklonu. Tudíž tvar ozubeného kola bude ve tvaru malé lodní kotvy a zuby nebudou po celém obvodu, ale pouze jen na  $\frac{1}{3}$  obvodu.

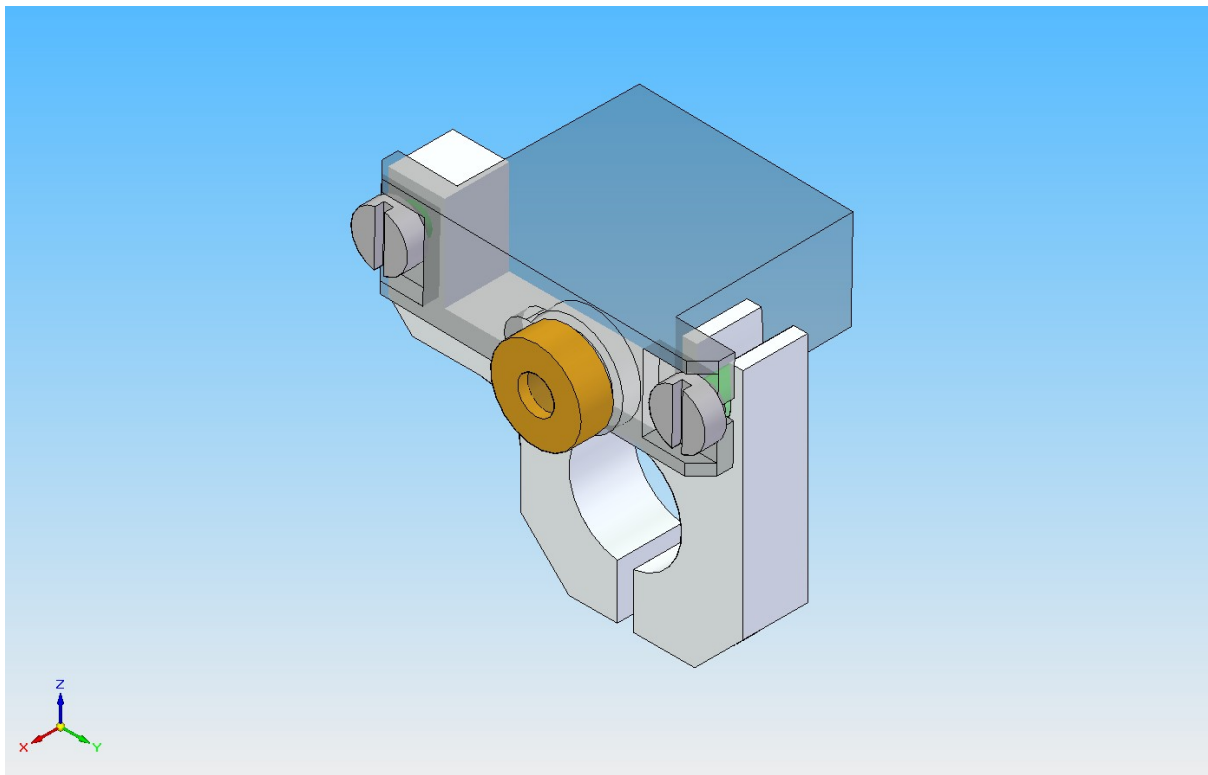
Zajištění proti protáčení ozubeného kola je řešeno pomocí dvou stavěcích šroubů se špičkou a vnitřním šestihranem s malým závitem.

Celý mechanismus je znázorněn na obrázku níže. Motor přes dodanou přírubu (znázorněno černě) k motoru je pomocí šroubů připevněn na speciální podložku (znázorněno bíle), která je přišroubována ke hřídeli. Ten je usazen v kluzných ložiskách (znázorněno fialově).



Na obrázku je zřejmý důvod zvláštního tvaru ozubeného kola. Aby náklon byl v dostatečném rozsahu, který je  $70^\circ$  (od vodorovné polohy osy rotoru  $\pm 35^\circ$ ) musí stěna ramene „zabíhat“ do ozubeného kola. Vzhledem k citlivosti není potřeba většího náklonu, proto toto řešení neomezuje ovladatelnost trikoptéry.

Osová vzdálenost soukolí je nastavitelná tím, že servomotor je uložen na jedné straně pomocí šroubu a na druhé straně je uložen také pomocí šroubu, který je v drážce. Bude-li potřeba seřídit osovou vzdálenost, je celý servomotor i s pastorkem (ozubené kolo na servomotoru – je to kolo hnací a má menší počet zubů) možno pootáčet kolem pevného šroubu, tak že druhý šroub se posouvá v drážce (viz. obrázek níže).



Po utažení šroubů je servomotor plně upevněn a osová vzdálenost neměnná.

Seřízení osové vzdálenosti by mělo být navrženo pomocí stavěcího mechanismu vzhledem k požadavkům na přesnost ustanovení, ale to by znamenalo mnohem více materiálu a složitější konstrukci. Po dohodě s panem Zdeňkem Šubrem jsme dospěli k závěru, že pro tento typ soukolí toto nastavení je dostačující. Důvodem je, že soukolí nekoná plné otáčky, ale pouze se naklápí.

## 3 Pevnostní výpočty

Pevnostní výpočty nám slouží pro navrhování konstrukce a i jako zpětná kontrola. Princip je založen na matematických vztazích, které jsou fyzikálně odvozené nebo experimentálně odvozené, kde vstupními hodnotami jsou okrajové podmínky (zatížení) a materiál, který má určité mechanické vlastnosti.

### 3.1 Pevnostní výpočet ramene

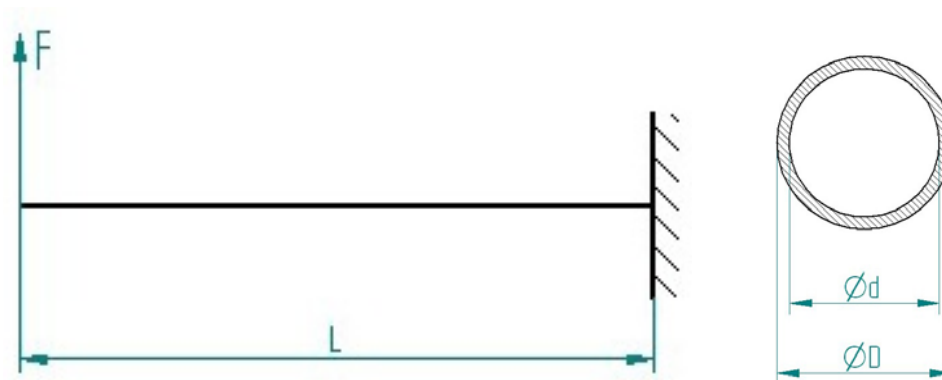
Pro kosteru trikoptéry je jako první potřeba navrhnout rozměry uhlíkové kompozitové trubky. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou už dány, viz. kapitola 1.3.6 *Mechanické vlastnosti* na straně 6. Okrajové podmínky jsou dány tahem motorů a hmotností celé trikoptéry.

Výpočty budou prováděny na „úrovni průmyslováka“, tím je myšleno to, že u tohoto kompozitního materiálu se mechanické vlastnosti velice liší na stavbě, struktuře a výrobě celé trubky. To je volba matrice, položení a směr vláken atd. Vzhledem k nedostatkům informací o materiálu a středoškolského vzdělání bude výpočet proveden zjednodušeně ze základních pevnostních rovnicích.

Pro okrajové podmínky se zvolí maximální tah motorů, zvětšený o případné přetížení 7%. Tah jednoho motoru je 1,07 kg. Cílem výpočtu bude průměr trubky, který se vypočítá z rovnice vyjádřené z pevností podmínky. Vzhledem k vynikajícím pevnostem materiálu a malého zatížení je předpoklad, že průměr vyjde velice malý. Proto jako další výpočet průměru bude proveden pomocí vzorce na průhyb.

#### 3.1.1 Výpočet průměru z pevností podmínky na ohyb

Rameno je upevněné ve svěrném členu. Pro zjednodušení bude rameno převedeno na vetknutý nosník, protože svěrný člen se dá považovat za pevný bod, který rameni odstraní všechny stupně volnosti, respektive přenáší ohybový moment, kroučící moment, tah a tlak.



$$F = T \times g$$

$$F = 1,06666 \times 9,80665$$

$$F = 10,46N$$

Rovnice napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_{DOV}$$

Modul průřezu v ohybu pro trubku:

$$W_o = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32D} \quad [12]$$

Dosazení do rovnice napětí ohybu tak, aby odpovídala zadání:

$$\frac{F \times L}{\frac{\pi (D^4 - d^4)}{32D}} \leq \frac{Rm \times 0,9 \times c_{II}}{K}$$

Kde

F – ohýbající síla [N], T – tah motoru [kg], L – vzdálenost síly od podpory [mm], g – tíhové zrychlení [ $m \times s^{-2}$ ],  $\sigma_o$  – ohybové napětí [MPa],  $M_o$  – ohybový moment [Nmm],  $W_o$  – modul průřezu v ohybu [ $mm^3$ ],  $\sigma_{DOV}$  – dovolené napětí [MPa], D – vnější průměr [mm], d – vnitřní průměr [mm]  $\Rightarrow d = D - 2$ , Rm – mez pevnosti v tahu [MPa],  $c_{II}$  – součinitel cyklického namáhání, stupeň druhý [–], K – bezpečnost [–]

Bezpečnost volím K=2, součinitel cyklického namáhání volím dle tabulek [13]  $c_{II} = 0,85$ .

Úprava a dosazení do rovnice:

$$\frac{32 \times F \times L \times D}{\pi \times (D^4 - d^4)} \leq \frac{Rm \times 0,9 \times c_{II}}{K}$$

$$32 \times K \times F \times L \times D \leq Rm \times 0,9 c_{II} \times \pi \times (D^4 - (D - 2)^4)$$

$$32 \cdot K \cdot F \cdot L \cdot D \leq Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot (D^4 - (D^4 - 8 \cdot D^3 + 24 \cdot D^2 - 32 \cdot D + 16))$$

$$32 \cdot K \cdot F \cdot L \cdot D - Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot (8 \cdot D^3 - 24 \cdot D^2 + 32 \cdot D - 16) \geq 0$$

$$32 \cdot K \cdot F \cdot L \cdot D - Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 + Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 - \\ - Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot 32 \cdot D + Rm \cdot 0,9 \cdot c_{II} \cdot \pi \cdot 16 \geq 0$$

$$32 \cdot 2 \cdot 10,46 \cdot 267 \cdot D - 1400 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 + 1400 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 - \\ - 1400 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot \pi \cdot 32 \cdot D + 1400 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot \pi \cdot 16 \geq 0$$

$$178\,740,48 \cdot D - 26\,917,17 \cdot D^3 + 80\,751,5 \cdot D^2 - 107\,668,66 \cdot D + 53\,834,33 \geq 0$$

*pro*  $D \in \mathbb{R}^+$

$$-26\,917,17 \cdot D^3 + 80\,751,5 \cdot D^2 + 71\,071,82 \cdot D + 53\,834,33 \geq 0$$

Po vyřešení polynomu třetího stupně pomocí kalkulačky CASIO ALGEBRA FX 2.0PLUS, která tuto funkci podporuje, jelikož středoškolská matematika neumí řešit rovnice podobného typu, vyšli tři kořeny.

$$D_1 = 3,82659538 \text{ mm}$$

$$D_2 = -0,4132978755 + 0,5931632062 \cdot i \text{ mm}$$

$$D_3 = -0,4132978755 - 0,5931632062 \cdot i \text{ mm}$$

Řešením je první kořen, protože druhý a třetí kořen nejsou z množiny reálných kladných čísel.

$$D = 3,82659538 \text{ mm}$$

$$d = D - 2$$

$$d = 3,82659538 - 2$$

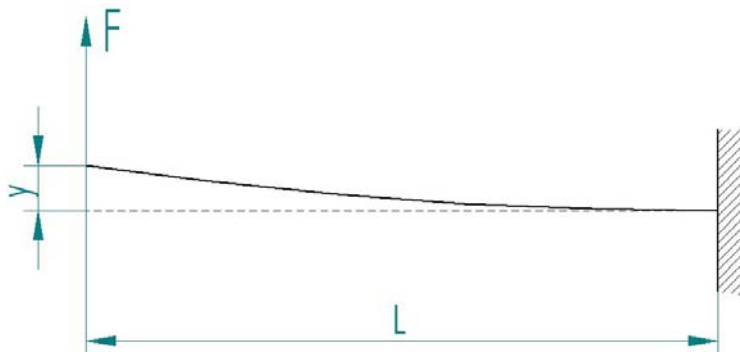
$$d = 1,82659538 \text{ mm}$$

Předpoklad, že průměr vyjde malý se potvrdil, tudíž se zvolí jiný postup.

### 3.1.2 Výpočet průměru z průhybu ramene

Vzhledem k tomu, že výrobce nevyrobí tak malé trubičky, je tedy zaručené, že trubka co bude použita vydrží tah motoru.

Je zde, ale také požadavek tuhosti. Při zatížení ramene tahem rotoru se rameno bude prohýbat, deformovat. Mým vlastním požadavkem je, aby rozměry trubek byly takové, aby deformace byla co nejmenší.



Rovnice průhybu při ohybovém namáhání:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad [14]$$

Kde

$y$  – průhyb [ $mm$ ],  $E$  – modul pružnosti v tahu [ $MPa$ ],  $I$  – kvadratický moment průřezu [ $mm^4$ ]

Průhyb nosníku musí odpovídat podmínce  $0 < y \leq 1$ . Rovnice bude upravena a průměry se vypočítají pro hodnoty průhybu  $y = 0,1 \text{ mm}$ ,  $y = 0,5 \text{ mm}$  a  $y = 1 \text{ mm}$

Kvadratický moment průřezu pro trubku:

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad [15]$$

Dosazení do rovnice tak, aby odpovídala zadání:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4)}$$

Úprava a dosazení do rovnice:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{\frac{3 \cdot E \cdot \pi \cdot (D^4 - (D-2)^4)}{64}}$$



$$y = \frac{64 \cdot F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot \pi \cdot \left( D^4 - (D^4 - 8 \cdot D^3 + 24 \cdot D^2 - 32 \cdot D + 16) \right)}$$

$$y \cdot 3 \cdot E \cdot \pi \cdot (8 \cdot D^3 - 24 \cdot D^2 + 32 \cdot D - 16) - 64 \cdot F \cdot L^3 = 0$$

$$y \cdot 3 \cdot E \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 - y \cdot 3 \cdot E \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 + y \cdot 3 \cdot E \cdot \pi \cdot 32 \cdot D - y \cdot 3 \cdot E \cdot \pi \cdot 16 - 64 \cdot F \cdot L^3 = 0$$

**pro  $D \in \mathbb{R}^+$  ;  $y = 0,1$**

$$0,1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 - 0,1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 + 0,1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 32 \cdot D - 0,1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 16 - 64 \cdot 10,46 \cdot 267^3 = 0$$

$$1\,055\,575,13 \cdot D^3 - 3\,166\,725,4 \cdot D^2 + 4\,222\,300,53 \cdot D - 2\,111\,150,26 - 12\,742\,230\,080 = 0$$

$$1\,055\,575,13 \cdot D^3 - 3\,166\,725,4 \cdot D^2 + 4\,222\,300,53 \cdot D - 12\,744\,341\,230,26 = 0$$

Kořeny rovnice jsou:

$$D_1 = 23,92504744 \text{ mm}$$

$$D_2 = -10,46252371 + 19,87884176 \cdot i \text{ mm}$$

$$D_3 = -10,46252371 - 19,87884176 \cdot i \text{ mm}$$

Řešením je první kořen, protože druhý a třetí kořen nejsou z množiny reálných kladných čísel.

**pro  $D \in \mathbb{R}^+$  ;  $y = 0,5$**

$$0,5 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 - 0,5 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 + 0,5 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 32 \cdot D - 0,5 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 16 - 64 \cdot 10,46 \cdot 267^3 = 0$$

$$5\,277\,875,67 \cdot D^3 - 15\,833\,626,97 \cdot D^2 + 21\,111\,502,63 \cdot D - 10\,555\,751,32 - 12\,742\,230\,080 = 0$$

$$5\,277\,875,67 \cdot D^3 - 15\,833\,626,97 \cdot D^2 + 21\,111\,502,63 \cdot D - 12\,752\,785\,830,32 = 0$$

Kořeny rovnice jsou:

$$D_1 = 14,39029928 \text{ mm}$$

$$D_2 = -5,695149643 - 11,63937654 \cdot i \text{ mm}$$

$$D_3 = -5,695149643 + 11,63937654 \cdot i \text{ mm}$$

Řešením je první kořen, protože druhý a třetí kořen nejsou z množiny reálných kladných čísel.

*pro*  $D \in \mathbb{R}^+$  ;  $y = 1$

$$1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 8 \cdot D^3 - 1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 24 \cdot D^2 + 1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 32 \cdot D - 1 \cdot 3 \cdot 140\,000 \cdot \pi \cdot 16 - 64 \cdot 10,46 \cdot 267^3 = 0$$

$$10\,555\,751,32 \cdot D^3 - 31\,667\,253,95 \cdot D^2 + 42\,223\,005,26 \cdot D - 21\,111\,502,63 - 12\,742\,230\,080 = 0$$

$$10\,555\,751,32 \cdot D^3 - 31\,667\,253,95 \cdot D^2 + 42\,223\,005,26 \cdot D - 12\,763\,341\,580,63 = 0$$

Kořeny rovnice jsou:

$$D_1 = 11,61630323 \text{ mm}$$

$$D_2 = -4,308151613 + 9,248211754 \cdot i \text{ mm}$$

$$D_3 = -4,308151613 - 9,248211754 \cdot i \text{ mm}$$

Řešením je první kořen, protože druhý a třetí kořen nejsou z množiny reálných kladných čísel.

Shrnutí výsledků:

y [mm]	øD [mm]	ød [mm]
0,1	23,925	21,925
0,5	14,39	12,39
1	11,616	9,616

Uhlíková trubka s průměrem 24 mm a tloušťkou stěny 1 mm nevyhovuje, protože ostatní částí kostry, které závisí na průměru trubky by byly veliké a výrazně by zvyšovali hmotnost.

Uhlíková trubka s průměrem 14,5 mm a tloušťkou stěny 1 mm vyhovuje, protože průhyb u této trubky je zcela vyhovující a průměr výrazně nezvětší rozměry svěrných členů.

Uhlíková trubka s průměrem 12 mm a tloušťkou stěny 1 mm nevyhovuje, protože výrazně snižší hmotnost celé kostry a průhyb je dvojnásobný oproti trubce s průměrem 14,5 mm, i když vyhovuje předem zvolené podmínce průhybu  $0 < y \leq 1$ .

Pro objednání materiálu jsem předložil požadavek pro uhlíkové trubky průměru 14 mm nebo 16 mm a tloušťky stěny 1 mm. Objednána byla trubka s průměrem 14 mm.

### 3.1.3 Výpočty napětí a průhybu pomocí Metody konečných prvků

Abych ověřil a použil moderní výpočetní metody, byla s pomocí pana Ing. Havlíka sjednána konzultace s panem Doc. Ing. Martinem Bílkem, Ph.D., který působí na

Technické univerzitě v Liberci, na Katedře textilních a jednoúčelových strojů, ohledně Metody konečných prvků.

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskretizaci/\* spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhavějšího) místa konstrukce [16].

S panem Doc. Bílkem jsme provedly MKP v programu Pro/Engineer. 3D sestavu trikoptéry bylo nutno zjednodušit, jelikož výpočty jsou velice náročné a doba výpočtů by byla v rádech hodin. Zjednodušení sestavy znamenalo odstranění spojovacího materiálu a jejich uložení, odstranění funkčnosti svírání u svěrných členů (svěrný člen byl převeden na „kostku s dírou“), odstranění úkosů a rádiusů a odstranění elektroniky. Toto zjednodušení na výsledky výpočtů nemá výrazný vliv, protože nemají vliv na pevnost spíše na odlehčení kostry modelu. Provedli se čtyři výpočty, kde první má nejnižší vstupní zatížení a u dalších výpočtů je vstupní zatížení postupně zvyšováno.

Aby bylo možno provést výpočty, muselo se konstrukci trikoptéry přiřadit podpěry tak, aby celkově odebraly všechny stupně volnosti. Provedlo se to tak, že ve středu trikoptéry je součást, která obsahuje otvor. Tomuto otvoru byly odebrány všechny stupně volnosti. Pro představu se toto dá převést tak, že trikoptéra byla za otvor ve středu přišroubována pevně k nedeformující a dokonale tuhé podložce.

---

/\* náhrada spojitého prostředí (kontinua) systémem diskrétních bodů, v nichž se soustředí fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa kontinua. Při studiu fyzikálních jevů se tím zpravidla nutnost řešení parciálních diferenciálních rovnic převádí na řešení obyčejných diferenciálních, popřípadě algebraických rovnic [17].

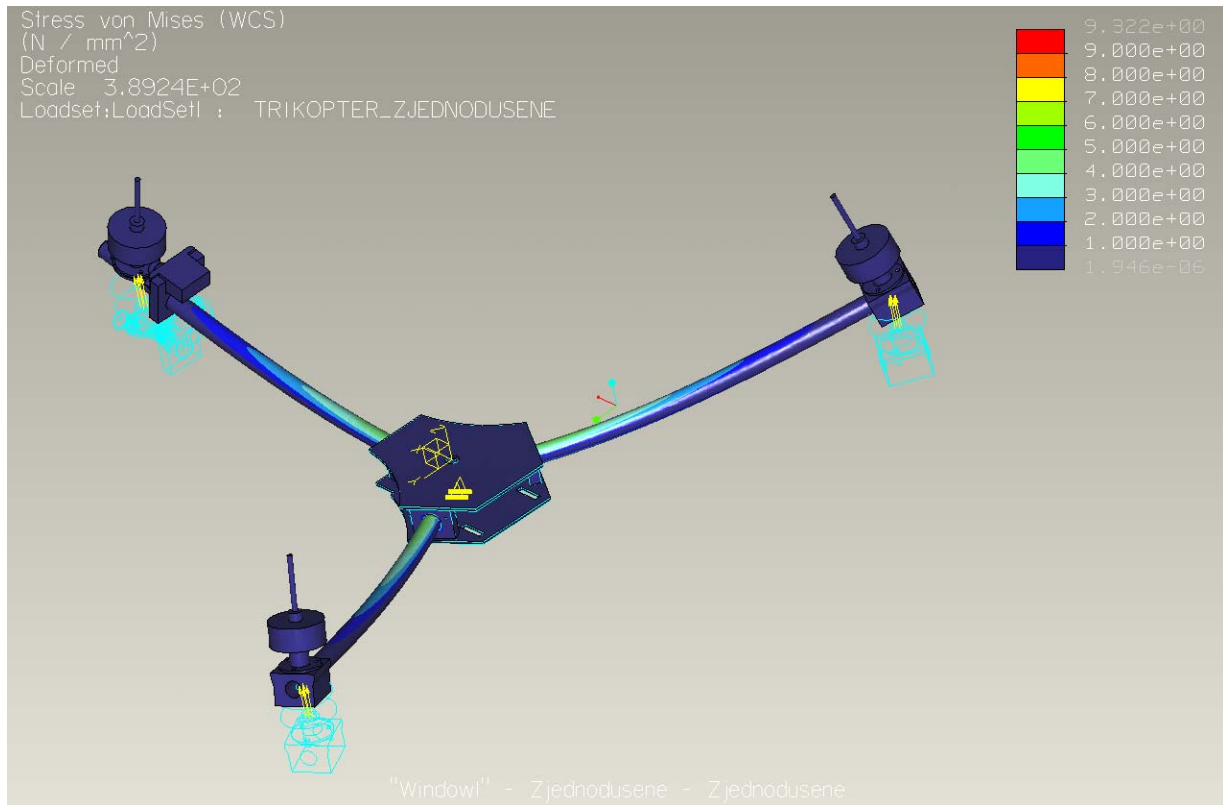
---

## Výpočty

První výpočet je se zatížením, které odpovídá přibližné hmotnosti kostry. Simulovaný tah motorů odpovídá stavu, kdy trikoptéra je těsně před vzletem.

Zatížení [Kg]	Celková tahová síla [N]	Tahová síla jednoho motoru [N]
0,7	6,86	2,29

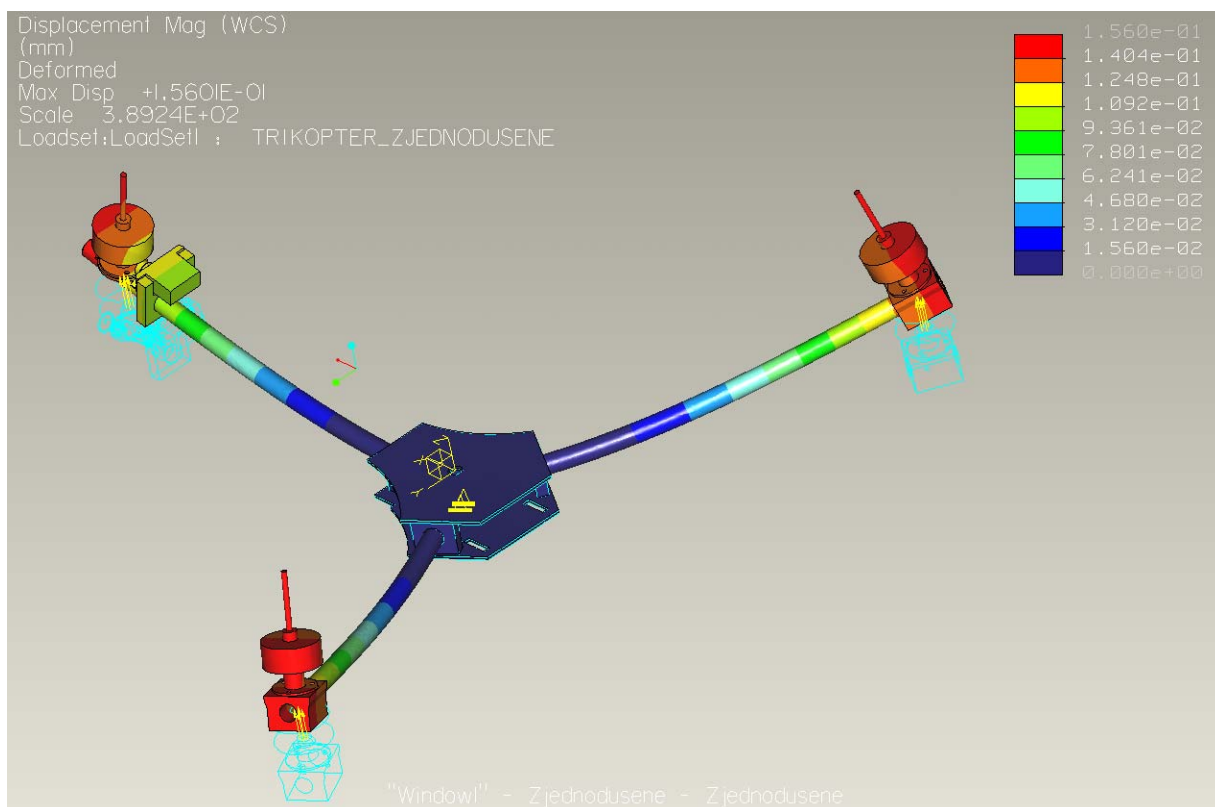
Napětí:



Výsledek:

V ramenech je napětí od 2 MPa do 6,5 MPa. Červené hodnoty jsou mezi, svěrným členem a ramenem, na obrázku nejsou vidět. Pan Doc. Bílek podotkl, že si myslí, že toto napětí je výsledek matematické chyby, protože pro počítání tohoto doteku by se zadávali jiné hodnoty. Tento předpoklad platí i pro další předložené výpočty napětí.

Deformace:



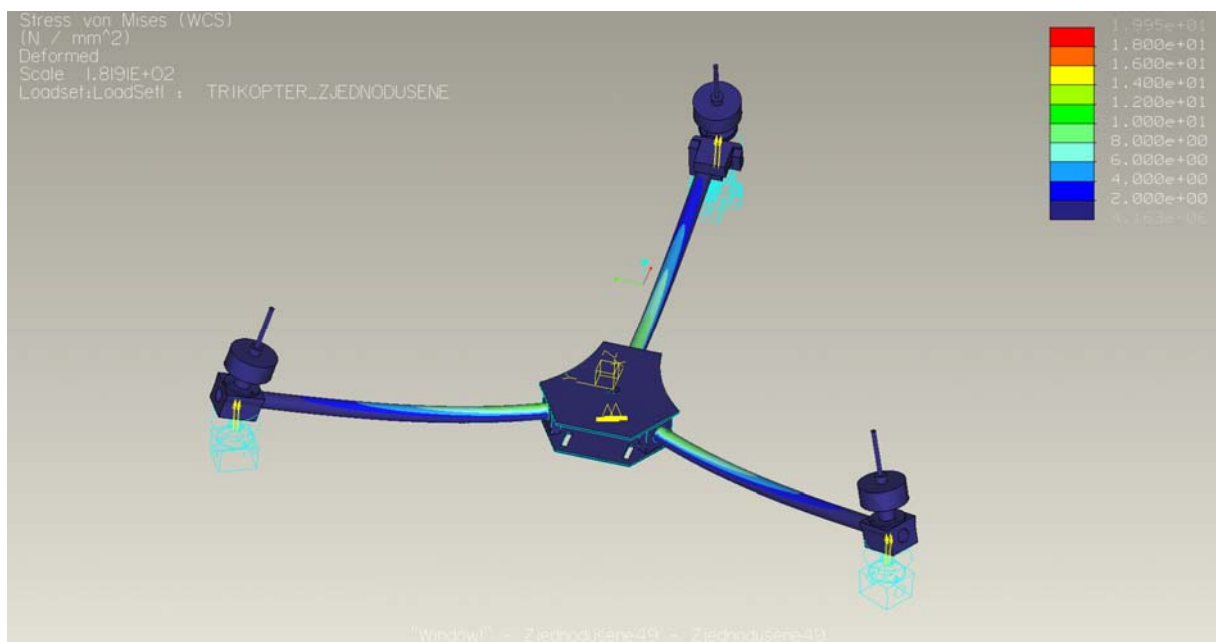
Výsledek:

Při tomto zatížení se konce ramen s motory zdeformují směrem nahoru (směr tahové síly motorů). Tento směr je stejný i u dalších výpočtů. Hodnota deformace se pohybuje kolem 0,14 mm ÷ 0,16 mm.

Druhý výpočet je se zatížením, kde trikoptéra už vzlétne a může zrychlovat směrem vzhůru (stoupat), ale není ještě schopna přenášet těžší břemena.

Zatížení [Kg]	Celková tahová síla [N]	Tahová síla jednoho motoru [N]
1,5	14,71	4,91

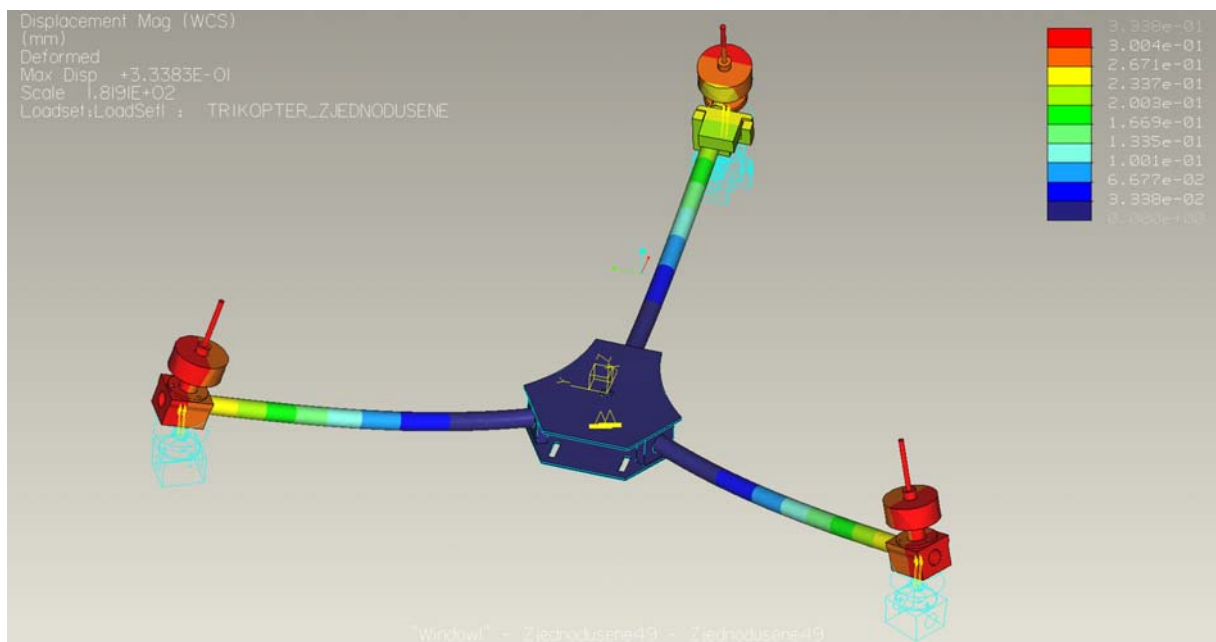
**Napětí:**



**Výsledek:**

V ramenech je napětí od 2 MPa do 13 MPa.

**Deformace:**



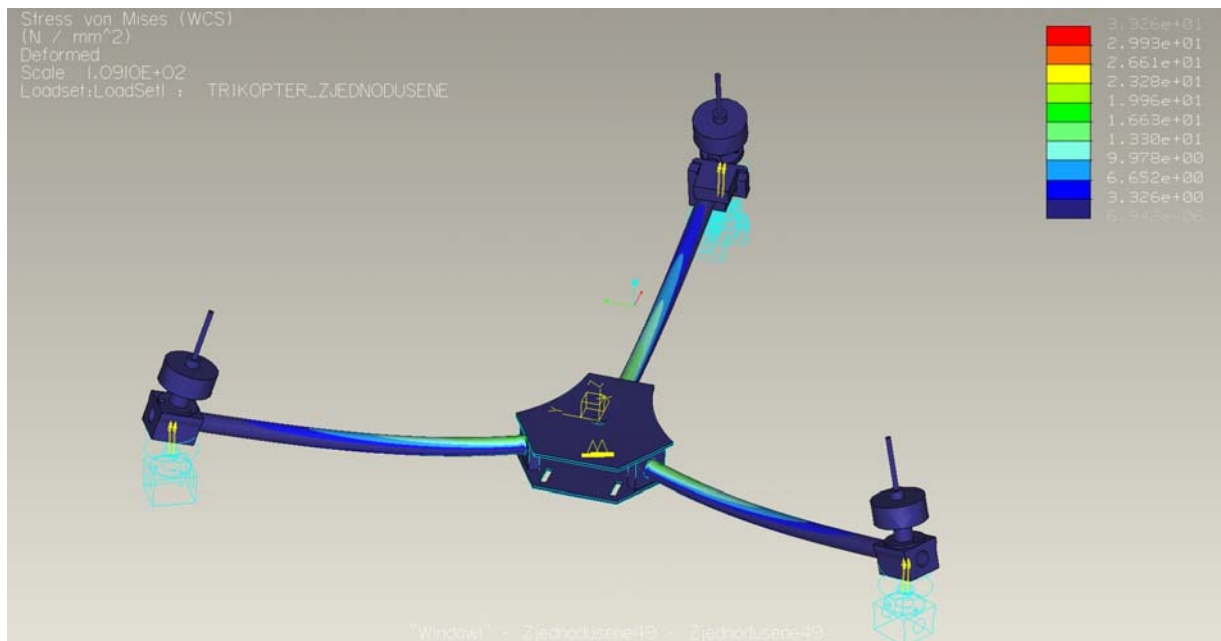
**Výsledek:**

Při tomto zatížení je hodnota deformace kolem 0,3 mm ÷ 0,33 mm.

Třetí výpočet je se zatížením, kde trikoptéra už vzlétne a může zrychlovat směrem vzhůru (stoupat), také je schopna přenášet břemena o hmotnosti pohybující se kolem 1 kg.

Zatížení [Kg]	Celková tahová síla [N]	Tahová síla jednoho motoru [N]
2,5	24,52	8,17

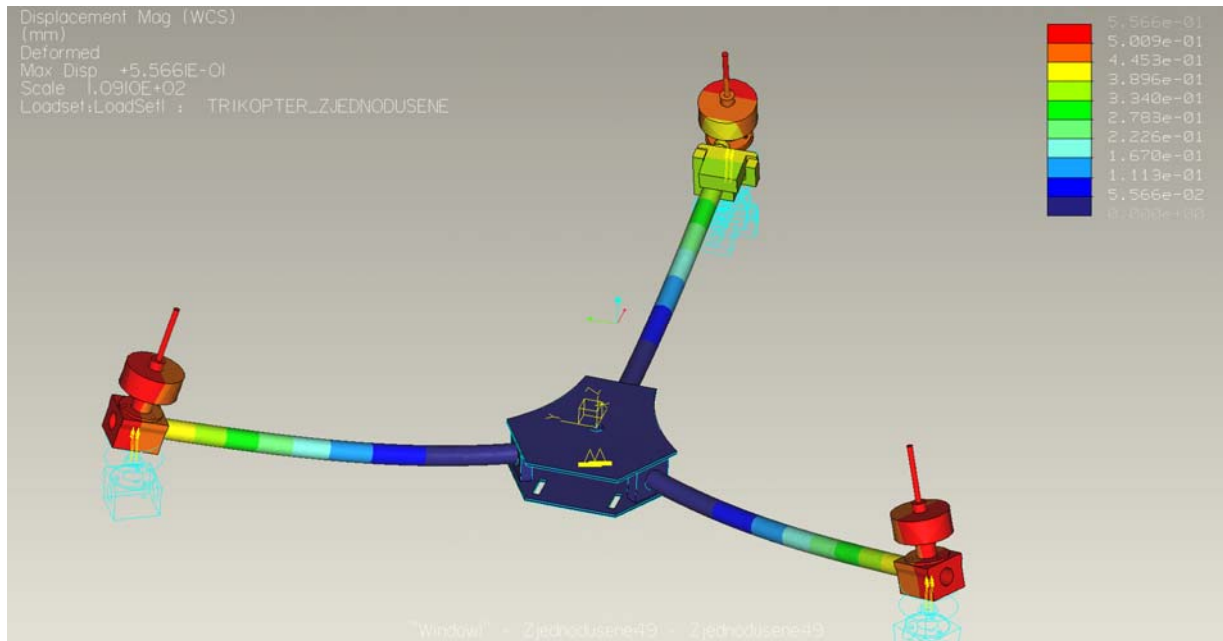
Napětí:



Výsledek:

V ramenech je napětí od 3,33 MPa do 22 MPa.

Deformace:



Výsledek:

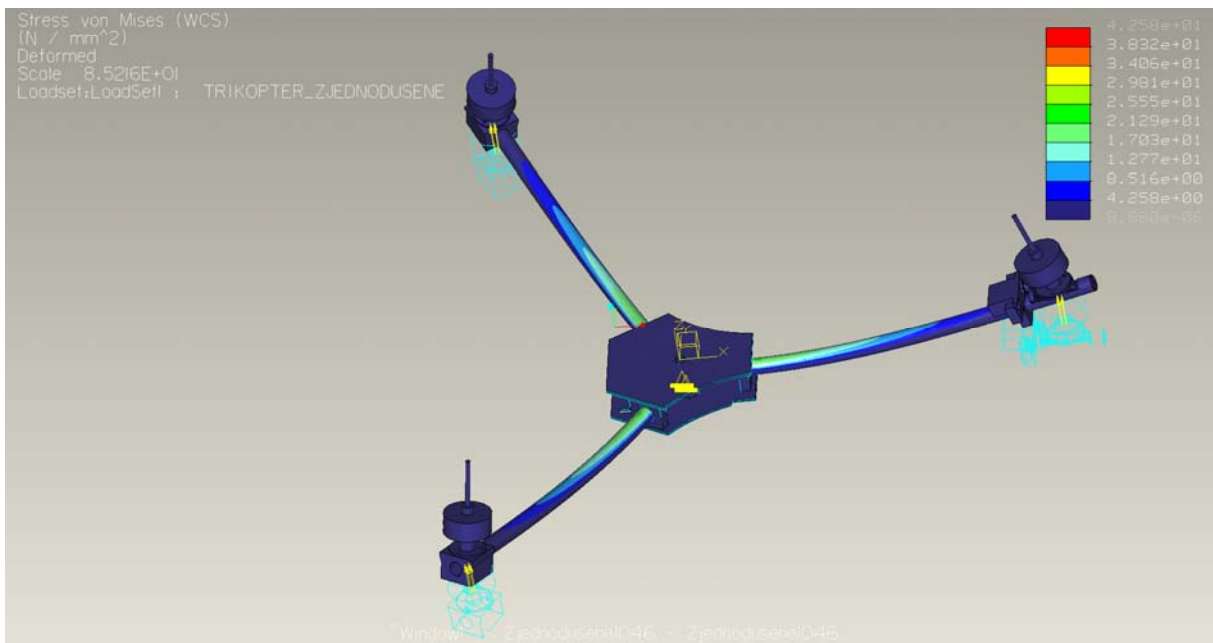
Při tomto zatížení je hodnota deformace kolem 0,50 mm ÷ 0,56 mm.

Čtvrtý výpočet je se zatížením, kde je počítáno s maximálním tahem motorů, plus 7% přetížení. Hodnoty zatížení dosazované v tomto výpočtu jsou shodné s hodnotami, s kterými bylo počítáno ručně v kapitole 3.1.1 a 3.1.2.

Zatížení [Kg]	Celková tahová síla [N]	Tahová síla jednoho motoru [N]
3,2	31,38	10,46



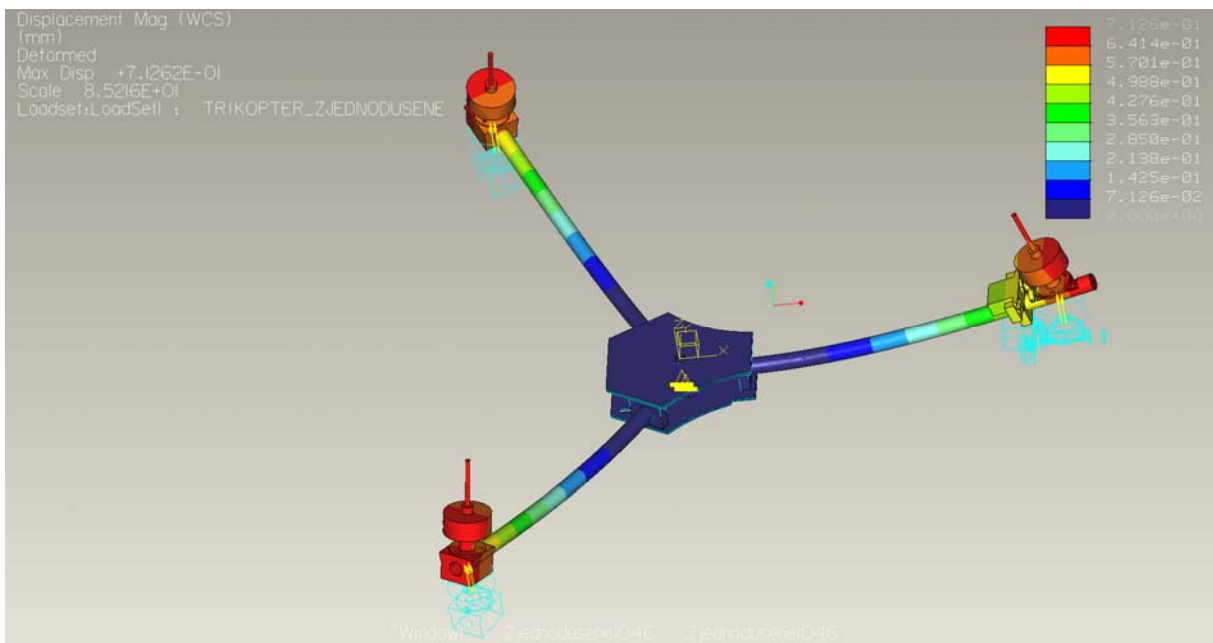
Napětí:



Výsledek:

V ramenech je napětí od 4,26 MPa do 27 MPa.

Deformace:



Výsledek:

Při tomto zatížení je hodnota deformace kolem 0,64 mm ÷ 0,71 mm.

Shrnutí výsledků výpočtů:

Výpočet [-]	Zatížení [kg]	Celková tahová síla [N]	Tahová síla jednoho motoru [N]	Napětí [MPa]	Deformace [mm]
1	0,7	6,86	2,29	2÷6,5	0,14÷0,16
2	1,5	14,71	4,92	2÷13	0,30÷0,33
3	2,5	24,52	8,17	3,33÷22	0,50÷0,56
4	3,2	31,38	10,46	4,26÷27	0,64÷0,71

Ve srovnání s ručním výpočtem jsou tyto hodnoty přesnější, protože do vstupních hodnot podmínek výpočtu lze zadat více údajů o materiálu a matematické postupy jsou mnohem přesnější. Navzdory těmto možnostem se výsledky rapidně neliší. Například u výpočtu č. 4 je deformace 0,64 mm ÷ 0,71 mm a ručním výpočtem podle rovnice [14] je deformace 0,54 mm.

## 4 Neúspěšná řešení a doporučení

Jako neúspěšné řešení považuji nedostatečnému vyhovění požadavku, aby trikoptéra byla skladná. Tím je myšleno to, aby ramena, na kterých jsou pouze rotory (bez náklonu) byla sklápěcí směrem k rameni s naklápěcím rotorem. Tím se přepokládá lepší skladnost a přeprava trikoptéry. Tomuto požadavku se nevyhovělo, protože by byla potřeba výrazněji zasahovat do vláknové struktury ramen, což není příznivé na vibrace a pevnost. Řešení které by nezasahovalo do vláknové struktury, by muselo být robustnější a tím by se zvyšovala hmotnost trikoptéry. Tato skladnost je možná pouze, jestliže se uvolní svěrné členy a ramena se sklopí i se svěrnými členy. Pro navrácení ramen do přesné polohy byla k modelu dodána malá sada pomocných montážních přípravků.

Doporučení pro další navrhování konstrukce bych uvedl problematiku ve vybírání uhlíkových materiálů. Zde hraje velkou roli průměr vláken, styl kladení vláken a typ matrice. Je velice důležité zvolit správné typy namáhání, které působí na konstrukční prvek, a požadavky, které chceme, aby byly splněny. Poté vybrat vhodnou výrobu uhlíkového kompozitu. Toto nejlépe konzultovat přímo s eventuálním výrobcem. Další doporučení je vtaženo k ložiskům na hřídel náklonu. Mnou zvolený materiál klade poměrně vyšší odpor než bylo přepokládáno a je možné, že toto způsobí servomotoru potíže při potřebě rychlých změn úhlu natočení. Zda pomůže zvolený převod ozubenými koly 1:2, který zvýší kroutící moment ukážou letové zkoušky. Případným řešením tohoto problému je konstrukce ložiska tak, že tělo ložiska bude z plastového materiálu a bude obsahovat kompozitovou výstelku, či-li bronz, mosaz apod. Výstelka nezvýší výrazně hmotnost a dokonce zlepší tření, pokud se bude pravidelně mazat ložisko. Nevýhodou je obtížnější výroba.

## Závěr

Byla vypracována kostra (drak) trikoptéry s použitím moderních materiálů. Celková hmotnost trikoptéry je 1,12 kg a čistá hmotnost kostry (bez elektroniky) je 0,356 kg, přičemž v zadání byl požadavek dodržet čistou hmotnost do 500 g. Roztečný průměr os rotorů je  $646 \pm 1$  mm, což odpovídá zadání cca 650 mm. Výsledné parametry odpovídají zadání. Celá kostra byla vyrobena vlastními silami ve školních dílnách. Nakupovanými prvky jsou pouze polotovary materiálů a spojovací materiál. Specifikum navrženého výrobku je především v řešení náklonu, jelikož navržená varianta s využitím ozubených kol není tak častá. Kostra trikoptéry se s pomocí panem Tomáš Kazdou, Bc., DiS. kompletně osadila elektronikou a připravila pro letové zkoušky. Do budoucna je možné osazení trikoptéry kamerou nebo fotoaparátem, a tím využít tohoto výrobku k pořizování snímků a záběrů z výšky mnoha desítek metrů.

Letové zkoušky budou finálním ověřením celého řešení a splnění úkolu mé dlouhodobé maturitní práce.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] RC HELICOPTER WIKI , *Image* [online], RC Helicopter Wiki, Datum poslední revize: 31. 12. 2009, [citováno 28. 02. 2011]  
<[http://rcheliwiki.com/Image:Tricopter\\_drawing.jpg](http://rcheliwiki.com/Image:Tricopter_drawing.jpg)>
- [2] WINDESTÅL, D, *The Tricopter builder* [online], RC Explorer, Datum poslední revize 28. 03. 2011, [citováno 28. 02. 2011]  
<<http://www.rcexplorer.se/projects/tricopter/tricopter.html>>
- [3] WILLIAM, TH., *Shrediquette DLX* [online], Shrediquette - a multirotor MAV by W. Thielicke, [citováno 28. 02. 2011]  
<[http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitepics/tricopter\\_dx\\_detail0.jpg](http://www.villalachouette.de/william/krim/tricopter/websitepics/tricopter_dx_detail0.jpg)>
- [4] Tricopter [online], [citováno 28. 02. 2011]  
<<http://www.robfrench.co.uk/node/45>>
- [5] PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE , *Překližka* [online], Wikipedia: Otevřená encyklopedie, 24. 6. 2009, Datum poslední revize 12. 1. 2011, [citováno 5. 03. 2011]  
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99ekli%C5%BEka>>
- [6] PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE , *Laminát* [online], Wikipedia: Otevřená encyklopedie, 22. 6. 2009, Datum poslední revize 23. 3. 2011 [citováno 5. 03. 2011]  
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1t>>
- [7] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.
- [8] ZAMĚSTNANCI 5M S.R.O., *Kompozitní profily* [online], 5M s.r.o., c2008, [citováno 5. 03. 2011] <<http://www.5m.cz/cz/kompozitni-profily/>>
- [9] PTÁČEK, L. - KOL, *Nauka o materiálu II*, 1. vyd. Brno: akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999. ISBN 80-7204-130-4. Kapitola Plasty, Tab. 19.1 Základní vlastnosti nejdůležitějších termoplastů, s. 260-261.

- [10] ZAMĚSTNANCI TITAN-MULTIPLAST S.R.O., *Kompozitní sendvičové panely NEOBON®* [online], TITAN-MULTIPLAST s.r.o., c2001-2009, [citováno 5. 03. 2011] <<http://www.titan-multiplast.cz/?item=sendvicove-panely-neobond>>
- [11] ZAMĚSTNANCI MERREM MATERIALS B.V., *PA6G Natural material data sheet* [online], Merrem Materials B.V., c2004-2011, [citováno 5. 03. 2011] < [http://www.merrem-materials.com/uploads/File/Kunststoffen/PA6G\\_natural.pdf](http://www.merrem-materials.com/uploads/File/Kunststoffen/PA6G_natural.pdf) >
- [12] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 3. vyd.Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7. Kapitola Mechanika, Výpočtové vztahy pro plochy, kvadratické momenty, polární momenty a průřezové moduly, s. 39-41.
- [13] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 3. vyd.Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7. Kapitola Mechanika, Součinitele snížení napětí podle způsobu zatížení, s. 38.
- [14] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 3. vyd.Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7. Kapitola Mechanika, Vetknuté nosníky a nosníky o dvou podpěrách, s. 44-45.
- [15] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. 3. vyd.Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7. Kapitola Mechanika, Výpočtové vztahy pro plochy, kvadratické momenty, polární momenty a průřezové moduly, s. 39-41.
- [16] PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE , *Metoda konečných prvků* [online], Wikipedia: Otevřená encyklopedie, 25. 3. 2007, Datum poslední revize 27. 02. 2011 [citováno 19. 03. 2011] <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)>
- [17] PŘÍSPĚVATELÉ COJECO , *Diskretizace* [online], CoJeCo, 14. 03. 2000, Datum poslední revize 01. 09. 2002 [citováno 19. 03. 2011] <[http://www.cojeco.cz/index.php?id\\_desc=20336&s\\_lang=2&detail=1&title=diskretizace](http://www.cojeco.cz/index.php?id_desc=20336&s_lang=2&detail=1&title=diskretizace)>

## A. Výrobní výkresy

Výrobní výkresy jsou přiloženy v externí příloze.

Seznam výrobních výkresů:

- Hřídel
- Klopná podložka
- Ložisko
- Nosič motoru
- Nosná deska spodní
- Nosná deska horní
- Ozubený segment
- Rameno el. Motoru
- Rameno náklonu
- Stojna
- Střed
- Svěrný člen
- Svěrný člen pojišťovací
- Trikoptéra
- Uložení servomotoru

## B. Výrobní postupy

Výrobní postupy jsou přiloženy v externí příloze.

Seznam výrobních postupů:

- Hřídel
- Klopná podložka
- Ložisko
- Nosič motoru
- Nosná deska spodní
- Nosná deska horní
- Ozubený segment
- Rameno el. Motoru
- Rameno náklonu
- Stojna
- Střed
- Svěrný člen
- Svěrný člen pojišťovací
- Uložení servomotoru



## **C. Obsah příloženého CD**

- 3D data a podklady
- NC programy
- Výrobní postupy
- Výrobní výkresy
- Zpráva