

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2024

Ing. Jakub Fiačan



Ing. Jakub Fiačan

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Návrh modulárnej konštrukcie autonómnych lietajúcich
prostriedkov podľa požadovaného výkonu pre priemyselné
použitie.**

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre konštruovania a častí strojov.

Predkladateľ: Ing. Jakub Fiačan
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Školiteľ: prof. Ing. Slavomír Hrček, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania a častí strojov

Oponenti:

1. prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů
Studentská 2, 461 17 Liberec
2. doc. Ing. Martin Bugaj, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta prevádzky, ekonomiky dopravy a spojov
Katedra leteckej dopravy
3. Ing. Juraj Prodan, PhD.
Elmax Žilina a. s.
Dlhá 85, 01009 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod. v miestnosti na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Slavomír Hrček, PhD.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

ÚVOD

Vývoj nových moderných technológií má zásadný vplyv na zmenu procesov prebiehajúcich v priemysle. Jedným z týchto procesov je aj proces prepravy, transportu vo firme, priemyselnej hale, medzi pobočkami firmy. V minulosti bol tento proces zabezpečený ľuďmi, ktorí ovládali dopravné prostriedky ktoré slúžili na prepravu. Týmito prostriedkami boli väčšinou prepravné vozíky, autá a vysokozdvížné vozíky.

Vďaka moderným technológiám je možné, aby proces prepravy prebiehal bez priamej účasti človeka. Väčšinou tento autonómny proces prebieha pomocou vopred naprogramovaných autonómnych cestných vozidiel. Postupne sa však dostáva do popredia aj používanie autonómnych lietajúcich prostriedkov.

Táto práca sa bude zo začiatku venovaná teoretickým poznatkom autonómnych lietajúcich prostriedkov. Konkrétne ich systémom fungovania, typom podľa prevádzkového použitia a jednotlivým výhodám a nevýhodám daných druhov dronov. Nasledujúca časť práce sa bude venovať jednotlivým častiam autonómneho lietajúceho prostriedku. Dôkladnejšie teoretické poznatky o samotnej konštrukcii častí a lepšie pochopenie systému ich fungovania, prispeje k tvorbe konzekventnejšieho modelu dronu.

Nasledujúca časť práce sa bude venovať optimalizácii dronu. Najprv je tu možné nájsť analýzu vstupných údajov. Následne je v práci dôkladne rozobraný vytvorený algoritmus v programe MATLAB, ktorý je krok po kroku opísaný viacerými metódami. Na základ algoritmu sú nájdené a následne aj prepočítané optimálne charakteristiky a vlastnosti dronu.

V poslednej časti je možné nájsť vytvorený 3D model dronu, ktorý je vytvorený na základe poznatkov získaných z optimalizácie.

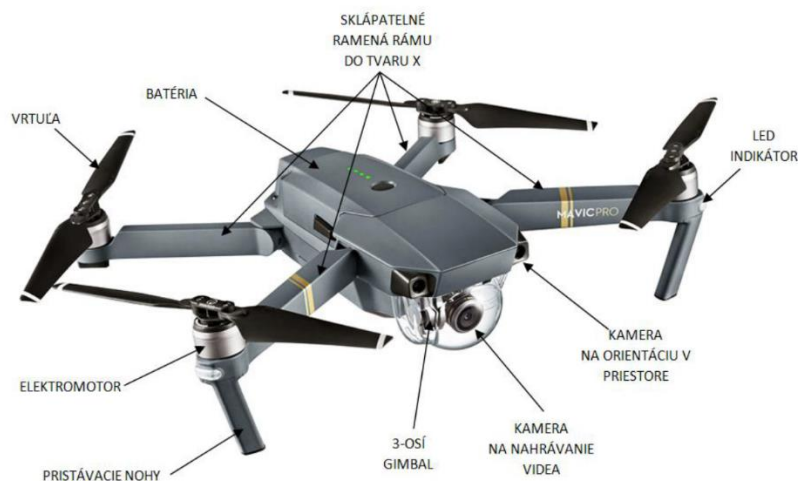
1. STRUČNÝ PREHĽAD PROBELMATIKY

Slovené pomenovanie dron má pôvod z angličtiny. Konkrétne sa anglické slovo „drone“ dá preložiť ako bzukot alebo bzučivý hluk. Pravdepodobne vďaka veľmi veľkej zvukovej podobnosti so zvukom bezpilotného lietajúceho prostriedku, sa toto slovo ihneď uchytilo vo verejných diskusiách. Korektné označenie, ktoré sa pre dané zariadenia používa, je označenie bezpilotné letecké prostriedky, z anglického UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Je možné použiť aj označenie bezpilotné letecké systémy, z anglickej skratky UAS (Unmanned Aerial Systems). Najvýstižnejší názov pre dané zariadenie, technológiu, je však názov diaľkovo ovládané bezpilotné letecké prostriedky.

Napriek tomu že bezpilotné letecké prostriedky je označenie, ktoré vytvára dojem že zariadenie nemá žiadneho pilota, nie je to tak. Drony svojho pilota väčšinou majú, ale je to pilot ktorý ich ovláda na diaľku, bez nutnosti sedieť priamo v danom prostriedku. Technicky je možné aj to aby drony pilota nemali, tu však nastáva väčší problém s legislatívou prevádzky a s bezpečnosťou majetku a ľudí.

2. ZÁKLADNÉ KONŠTRUKČNÉ PRVKY MULTIKOPTÉRY A ICH VYUŽITIE V PRIEMYSLE

Na stavbu multikoptéry, dronu s dvoma a viac ramenami, môže byť použitých veľa spôsobov konštrukcií. Druh ich konštrukcie závisí najmä od spôsobu použitia. Medzi základné časti bežných dronov patrí: podvozok, batéria, vrtule, elektromotory, Gimbal, kamera na orientáciu v priestore a rám.



Obr. 1 DJI Mavic Pro - základné konštrukčné časti (2)

3. ANALÝZA OPTIMÁLNYCH NOSNOSTÍ MODULÁRNEHO DRONU

Táto časť je zameraná na analýzu optimálnych vlastností vytvorených modulárnych dronov. Cieľom je identifikovať konfigurácie modulov, ktoré vedú k dosiahnutiu maximálneho doletu pre rôzne požiadavky na nosnosť a funkčnosť. Cieľom správneho návrhu nosností jednotlivých dronov, je čo najlepšie zanalyzovať nosnosť prepraveného tovaru. Nosnosti dronov je nutné rozdeliť tak, aby pokrývali rôzne hmotnostné kategórie a zároveň boli efektívne.

3.1 Vstupné informácie

Najdôležitejšie vstupné údaje sú záznamy ohľadom počtosti a hmotnosti prepravovaného tovaru, balíka, jednotlivými fabrikami a spoločnosťami. Z literatúry a aj výročných sprav fabrík a logistických spoločností, je možné vyčítať množstvo informácií ohľadom hmotností prepravovaného tovaru. Najpodrobnejšie si tieto informácie zaznamenávajú kuriérske a poštové služby, ktoré by modulárne drony na priemyselné použitie vo svojich centrálnych tiež vedeli využiť. Zo všetkých vstupných informácií je vytvorená tabuľka, ktorú je možné vidieť Tab. 1.

Tab. 1 početnosť a hmotnosť prepravovaných balíkov

Spoločnosť	Priemerná Hmotnosť Balíka/Tovaru [kg]	Hmotnostné Kategórie [%]	Poznámky
Slovenská Pošta	3.1	60% do 2 kg, 30% do 5 kg, 10% nad 5 kg	Detailné údaje zhrnuté z 63 miliónov balíkov -
Česká Pošta	2-3	-	údaje zhrnuté z 112 miliónov balíkov
DHL	3	-	Detailnejšia analýza nie je verejne dostupná
UPS	2	-	Detailnejšia analýza nie je verejne dostupná
FedEx	2.5	-	Detailnejšia analýza nie je verejne dostupná
GLS	5	-	Detailnejšia analýza nie je verejne dostupná
Poczta Polska	2.5	-	Detailnejšia analýza nie je verejne dostupná
Amazon	2.26	90% do 2.26 kg	Dron stačí na 90% tovarov
Škoda	5	-	Dron pre ťažší tovar
Groupe PSA	Rozloženie podľa hmotnostných kategórií	19% do 1 kg, 21% 1-3 kg, 33% 3-5 kg, 17% 5-10 kg,	Maximálna hmotnosť tovaru je 10 kg

3.2 Optimalizácia

Optimalizácia je oblasť matematiky o rozhodovaní, ktorá sa zaoberá hľadaním najlepšieho riešenia pre daný problém v rámci definovaných obmedzení. Nasledujúce definície predstavujú základné pojmy a koncepty, ktoré sú kľúčové pre pochopenie optimalizácie.

- **Optimalizačný problém:** je matematicky formulovaný problém, v ktorom je cieľom nájsť najlepšie možné riešenie z množiny všetkých možných riešení, ktoré spĺňajú dané obmedzenia.
- **Cieľová funkcia:** je matematická funkcia, ktorú sa snažíme minimalizovať alebo maximalizovať v optimalizačnom probléme. Predstavuje meranie výkonu, efektívnosti alebo nákladov, ktoré chceme optimalizovať.
- **Obmedzenia:** sú podmienky, ktoré musia byť splnené, aby bolo riešenie považované za prijateľné. Obmedzenia môžu zahŕňať fyzikálne, technické, ekonomické alebo iné limity.
- **Prípustná množina:** je súbor všetkých riešení, ktoré spĺňajú dané obmedzenia. Každé riešenie v tejto množine je možné, avšak nemusí byť optimálne.

- Optimálne riešenie: je také riešenie, ktoré dosahuje najlepšiu možnú hodnotu cieľovej funkcie v rámci prípustnej množiny. Optimálne riešenie môže byť globálne alebo lokálne. Globálne optimálne riešenie je najlepšie v celom rozsahu prípustnej množiny. Lokálne optimálne riešenie je najlepšie riešenie v určitom lokálnom okolí prípustnej množiny.

Aplikácie optimalizácie má široké spektrum aplikácií v rôznych oblastiach, napríklad:

- Výroba a priemysel: Optimalizácia výrobných procesov, plánovanie výroby, riadenie zásob.
- Doprava a logistika: Optimalizácia trás, plánovanie dopravy, riadenie flotíl.
- Financie: Optimalizácia portfólia, riadenie rizík, plánovanie investícií.
- Energetika: Optimalizácia výroby a distribúcie energie, riadenie obnoviteľných zdrojov.
- Telekomunikácie: Optimalizácia siete, riadenie kapacity, plánovanie frekvenčného spektra.
- Zdravotníctvo: Plánovanie zdravotnej starostlivosti, optimalizácia liečebných postupov, rozvrhovanie operácií a personálu.

4. OPTIMALIZÁCIA UAV

Cieľom tejto časti je navrhnúť správny postup optimalizácie, na základe ktorého bude vyskladaná najvhodnejšia kombinácia UAV, ktorá bude zohľadňovať vstupné parametre a obmedzenia pre použitie v konkrétnej prevádzke.

Na základe optimalizácie sa nájde najlepšia kombinácia pohonného ústrojenstva, batérií a počtu modulov pre autonómne lietajúce prostriedky, ktorá maximalizuje efektivitu systému pri rôznych zaťaženiach a časoch letu. Výsledkom analýzy bude aj jeden modul UAV, ktorý bude mať optimálnu veľkosť, optimálnu batériu a pohonné ústrojenstvo. Modulárne UAV môže pozostávať z jedného modulu, ale aj z neobmedzeného počtu modulov, ktoré budú navzájom prepojené. Pre každý modul je charakteristické, že je schopný fungovať spoločne s ostatnými modulmi UAV, ale aj samostatne nezávisle od seba. Pri optimalizácii je hlavný dôraz kladený na nasledujúce charakteristiky:

- maximalizáciu celkovej technickej hodnoty,
- zohľadnenie praktických obmedzení,
- identifikácia najlepšej konfigurácie.

Pod pojmom maximalizácie celkovej technickej hodnoty sa rozumie vytvorenie optimálnej kombinácie všetkých parametrov, s cieľom dosiahnuť čo najvyššiu celkovú technickú hodnotu. Vypočíta sa na

základe technických hodnôt ktoré zohľadňujú vstupné aj výstupné parametre (prepravovaná váha, celková váha, doba letu, počet modulov...).

Je dôležité aby sa pri optimalizácii dbalo aj na zohľadnenie praktických obmedzení. Najdôležitejším je aby bol ťah pohonného ústrojenstva dostatočný na to, aby bolo UAV schopné letu. Je však počítané s určitým koeficientom bezpečnosti na to, aby bola zabezpečená bezpečnosť, dostatočná ovládateľnosť a stabilita letu.

Na základe analýzy vstupných parametrov, ako sú požadované doby letu a váha prepravovaného materiálu, sa optimalizáciou navrhne modul, ktorý bude najvhodnejší z hľadiska počtu modulov a celkovej konfigurácie. Takýto prístup umožňuje flexibilné prispôsobenie UAV rôznym požiadavkám a podmienkam prevádzky, čím sa zvyšuje jeho efektivita a univerzálnosť.

4.1 Kapacita batérií – vstupná hodnota

Kapacity batérií sú jedným z kľúčových parametrov, ktoré určujú dobu letu UAV. Kapacita batérie je označená ako CB. Rozsah kapacít batérií je zvolený tak, aby pokryl rôzne energetické požiadavky pre drony, v závislosti od hmotnosti prepravovaného materiálu a dĺžky doletu. Väčšie kapacity batérií umožňujú dlhší čas letu, avšak zvyšujú celkovú hmotnosť UAV, čo môže negatívne ovplyvniť jeho letové vlastnosti. Nakoľko pri procese optimalizácie bude výsledkom jedna konkrétna batéria s presnou kapacitou, bude sa táto batéria vyrábať na mieru. Nemusíme sa tým pádom zaoberať problémom, že batéria s danou presnou kapacitou nie je momentálne na trhu.

Najdôležitejšou vstupnou hodnotou pre optimalizačný výpočet je kapacita batérie na určitú jednotku hmotnosti, čiže energetická hustota. Vyššia energetická hustota znamená, že batéria môže poskytnúť viac energie na jednotku hmotnosti, čo je kritické pre udržanie dlhšieho letu bez výrazného zvýšenia hmotnosti UAV. Energetická hustota sa udáva v jednotkách W_h/kg .

Je možné nájsť publikácie, ktoré sa téme energetickej hustoty batérií venujú rozšírenejšie. Nájdeme v nich aj experimentálne batérie s veľmi vysokou energetickou hustotou. Niektoré z nich dosahujú dokonca aj energetickú hustotu $500 W_h/kg$. Sú to však batérie, na ktorých ešte len prebieha vývoj. Problémom pri týchto experimentálnych batériách je aj použitie drahých materiálov a zložitých technológií, vďaka ktorým jej budúca cena výroby niekoľko násobne rastie. Cieľom je použiť baterku, ktorá je nie len vyrobiteľná ale aj cenovo dostupná. Najvhodnejšia metóda výberu optimálnej vstupnej hodnoty energetickej hustoty bola teda zvolená štatistická analýza energetickej hustoty batérií. Cieľom tejto metódy je získať reprezentatívnu hodnotu energetickej hustoty. Táto metóda sa skladá z:

- zber dát,
- výpočet individuálnych hodnôt,
- štatistické spracovanie dát.

Vstupným údajom pre zber dát bude 100 batérií, ktoré sa komerčne používajú na drony. Tieto batérie sú bežne dostupné a je ich možné kúpiť v špecializovaných obchodoch. Je nutné dbať na to, aby boli tieto batérie rôznych značiek, modelov a kapacít. Týmto sa zabezpečí, že bude získané široké spektrum vstupných údajov. Ako najdôležitejšie vstupné údaje, ktoré sa vyhodnocujú, sú fyzikálne údaje ohľadom hmotnosti batérie, kapacity, počtu článkov a napätia. Tieto hodnoty je možné nájsť na štítku batérie alebo aj v ich technických listoch.

Pri výpočte individuálnych hodnôt je nutné dbať na to, že hodnotu kapacity batérie v mAh je nutné prepočítať na Wh . Dôvod je ten, že nie všetky batérie majú rovnaký počet dvojíc článkov a rovnaké napätie.

$$C_{Wh} = \frac{n_{\xi} \cdot C_{mAh} \cdot U_b}{1000} \quad (1)$$

Kde:

- C_{Wh} - kapacita batérie [Wh],
- n_{ξ} - počet dvojíc článkov batérie,
- C_{mAh} - kapacita batérie [mAh],
- U_b - napätie článku batérie [V].

Keď je vypočítaná kapacita batérie C_{Wh} , môže sa pristúpiť k výpočtu energetickej hustoty batérie. Na tento výpočet potrebujeme okrem už vypočítaných hodnôt aj hmotnosť batérie.

$$ED = \frac{C_{Wh}}{m_b} \quad (2)$$

Kde:

- ED - Energetická hustota batérie [Wh/kg],
- C_{Wh} - kapacita batérie [Wh],
- m_b - hmotnosť batérie [kg].

Po ukončení výpočtov individuálnych hodnôt sa prejde k poslednému kroku, štatistickému spracovaniu dát. V tomto kroku sa spočítajú všetky hodnoty energetickej hustoty z ktorých sa následne vypočíta aritmetický priemer.

$$Am_{ED} = \frac{\sum_{k=1}^n ED_k}{n} \quad (3)$$

Kde:

- Am_{ED} - aritmetický priemer energetických hustôt [Wh/kg],
- n - počet vstupných údajov, bateriek,
- ED - Energetická hustota batérie [Wh/kg].

V nasledujúcej tabuľke, Tab.2, je možné vidieť vybrané batérie zo zberu dát. Je v nej možné vidieť vstupné informácie, ako sú napríklad hmotnosť a označenie batérie, z ktorého je možné vyčítať počet dvojíc článkov. Je ďalej možné vidieť aj vypočítané hodnoty, ako sú kapacita [Wh] a energetická hustota [Wh/kg]. Kvôli veľkému rozsahu zberných údajov je v nasledujúcej tabuľke vybraná iba určitá časť z nich, zobrazené sú najextrémnejšie hodnoty. Z tohto dôvodu je možné, ba až isté, že celkový aritmetický priemer energetickej hustoty nasledujúcej tabuľky vyjde odlišný ako z celkového počtu zberu dát.

Tab. 2 Štatistická analýza energetickej hustoty batérií

Kapacita batérie [mAh]	Hmotnosť batérie [kg]	Označenie batérie	Kapacita batérie [Wh]	Napätie batérie [V]	Energetická hustota batérie [Wh/kg]
4000	0,402	4s 1p	59,2	14,8	147,26
5050	0,358	3s 1p	56,06	11,1	156,57
1550	0,254	6s 1p	34,41	22,2	135,47
22000	5,64	5s 2p	814,3	18,5	144,32
10000	3,51	5s 3p	555	18,5	158,119
4500	0,56	6s 1p	99,9	22,2	178,39
12000	1,485	5s 1p	221	18,5	149,49
3830	0,26	3s 1p	43,66	11,1	167,93
20000	2,72	6s 1p	444	22,2	163,24
500	0,013	1s 1p	1,85	3,7	142,31

Výsledkom štatistickej analýzy na celkovom počte 100 skúmaných vzoriek bateriek je aritmetický priemer energetických hustôt ktorý je $Am_{ED} = 163,15$ Wh/kg. Táto hodnota bude použitá v nasledujúcich výpočtoch pomocou programu MATLAB pod označením k_{MB} . Je možné teda konštatovať že $Am_{ED} = k_{MB} = 163,15$ Wh/kg.

Výsledkom štatistickej analýzy na celkovom počte 100 skúmaných vzoriek bateriek je aritmetický priemer energetických hustôt ktorý je $Am_{ED} = 163,15$ Wh/kg. Táto hodnota bude použitá v nasledujúcich výpočtoch pomocou programu MATLAB pod označením k_{MB} . Je možné teda konštatovať že $Am_{ED} = k_{MB} = 163,15$ Wh/kg.

Výsledkom štatistickej analýzy na celkovom počte 100 skúmaných vzoriek bateriek je aritmetický priemer konštanty ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva, ktorý je $Am_{ktm} = 36,82$. Táto výsledná hodnota sa bude ďalej používať v optimalizačných výpočtoch pomocou programu MATLAB.

4.2 Pohonné ústrojenstvo – vstupná hodnota

Pohonné ústrojenstvo je kľúčovou súčasťou každého dronu, zodpovednou za vytváranie potrebného ťahu. Skladá sa primárne z dvoch hlavných komponentov: motora a vrtule. Kombinácia motora a vrtule musí byť starostlivo vybraná a optimalizovaná na základe konkrétnych požiadaviek dronu, ako sú požadovaná rýchlosť a nosnosť.

Pre vstupy do prebiehajúcej optimalizácie je braný motor aj vrtuľa ako jeden neoddeliteľný celok. Dôvodom je to, že každý motor má priamo od výrobcu doporučenú vrtuľu, na základe ktorej má motor (aj s vrtuľou) daný ťah. Ako vstupy pre optimalizáciu je nutné zistiť, aký je ťah pohonného ústrojenstva v pomere s hmotnosťou pohonného ústrojenstva. Keďže ťah aj hmotnosť pohonného ústrojenstva sa udáva v rovnakých jednotkách, v gramoch, túto hodnotu bude možné považovať za bezrozmernú konštantu. Na to aby bola zistená táto konštantu, je nutné urobiť štatistickú analýzu hmotnosti a ťahu pohonného ústrojenstva. Cieľom tejto štatistickej analýzy, je získať reprezentatívnu hodnotu pomeru ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva, ktorá bude ďalej použitá v optimalizačnom procese pomocou programu MATLAB. Táto metóda sa skladá z:

- zber dát,
- výpočet pomeru ťahu a hmotnosti,
- Štatistické spracovanie dát.

Vstupným údajom štatistickej analýzy je, takisto ako to bolo aj v predchádzajúcej štatistike, 100 motorov spolu s doporučenými vrtuľami. Je nutné zabezpečiť, aby boli vybraté motory od rôznych výrobcov (výber výrobcov vrtúľ bude zodpovedať odporúčaniam výrobcu motorov, ktoré sú optimalizované pre daný motor). Vďaka zahrnutiu motorov z rôznych trhových segmentov sa zabezpečí široké spektrum vstupných údajov. Do tejto štatistiky je nutné zahrnúť aj rôznorodosť výkonových špecifikácií motorov, či už sa jedná o motory s nižšou hmotnosťou a nižším ťahom, ako aj motory s vyšším ťahom a tým aj prislúchajúcou vyššou hmotnosťou. Každý motor s vrtuľou má vo svojich technických špecifikáciách uvedenú hmotnosť. Takisto je uvedený v týchto špecifikáciách aj celkový ťah tejto zostavy pri určitých otáčkach. Pre našu optimalizáciu budeme brať do úvahy celkový ťah pohonného ústrojenstva pri najvyšších otáčkach motora. Je však samozrejmosťou, že tieto motory nedokážu poskytovať tieto maximálne otáčky (čiže maximálny výkon pohonného ústrojenstva) po celý čas svojej prevádzky. Dôvod pre tento výber je však ten, že pri ďalších prepočtoch v programe MATLAB budeme pri letových vlastnostiach uvažovať aj s koeficientom bezpečnosti pomeru ťahu na hmotnosť celého UAV, vrátane prepravovaného nákladu. Tento koeficient bezpečnosti sa počíta vzhľadom na maximálny ťah motorov.

Ďalším, nemenej limitujúcim faktorom, ktorý nám z tejto analýzy vyplynie, je aj výsledná vrtuľa. Aj keď jej veľkosť sa na prvý pohľad nezdá až tak dôležitá, je to práve ona, ktorá nám určí minimálnu vzdialenosť osi rotorov od seba. Keďže väčšie vrtule vyžadujú väčšie rozostupy medzi rotormi, výsledkom je nárast celkových rozmerov dronu. Aby sa zabezpečilo, že vrtule nebudú zasahovať jedna do druhej počas letu, musia byť osi rotorov vzdialené aspoň o priemer jednej vrtule plus dostatočný bezpečnostný odstup. Tento bezpečnostný odstup môže byť rôzny v závislosti od stability letu a dizajnu dronu, ale obvykle sa pridáva aspoň 10-20 % priemeru vrtule.

Pri výpočte pomeru ťahu a hmotnosti je nutné dbať na to, aby boli hodnoty ťahu zadané v rovnakých jednotkách. Nakoľko sa pri niektorých pohonných ústrojenstvách môžeme stretnúť s tým, že ťah nie je uvedený v gramoch ale v newtonoch. Jedná sa však väčšinou už o pohonné ústrojenstvá väčších rozmerov. Ťah pohonných ústrojenstiev, ktoré sa používajú pre transportné drony v priemysle, sa väčšinou udáva v gramoch.

Vzorec na výpočet konštanty ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva je možné vidieť tu :

$$k_{tm} = \frac{T_e}{m_e} \quad (4)$$

Kde: k_{tm} – konštanta ťahu na hmotnosť pohonného ústrojenstva,

T_e – ťah pohonného ústrojenstva [g],

m_e – hmotnosť pohonného ústrojenstva [g].

Po ukončení výpočtov individuálnych hodnôt je nutné prejsť k poslednému kroku tejto analýzy, tým je štatistické spracovanie dát. V ňom sa spočítajú všetky hodnoty konštánt ťahu na hmotnosť pohonného ústrojenstva, z ktorých sa následne vypočíta aritmetický priemer.

$$Am_{ktm} = \frac{\sum_{k=1}^n k_{tm}}{n} \quad (5)$$

Kde: Am_{ktm} – Aritmetický priemer konštánt ťahu na hmotnosť pohonného ústrojenstva,
 n – počet vstupných údajov, bateriek,
 k_{tm} – konštanta ťahu na hmotnosť pohonného ústrojenstva.

V nasledujúcej tabuľke, Tab. , je možné vidieť vybrané pohonné ústrojenstvá zo zberu dát. V tabuľke je možné vidieť vstupné informácie, ako sú napríklad hmotnosť a označenie vrtule, ale aj ťah vrtule pri maximálnych otáčkach motora. Je možné vidieť aj vypočítanú hodnotu pomeru ťahu k hmotnosti. Kvôli veľkému rozsahu zberných údajov je v nasledujúcej tabuľke vybrané iba určitá časť z nich. Z tohto dôvodu je možné, ba až isté, že celkový aritmetický priemer pomeru ťahu k hmotnosti pohonného ústrojenstva nasledujúcej tabuľky je odlišný, ako z celkového počtu zberu dát.

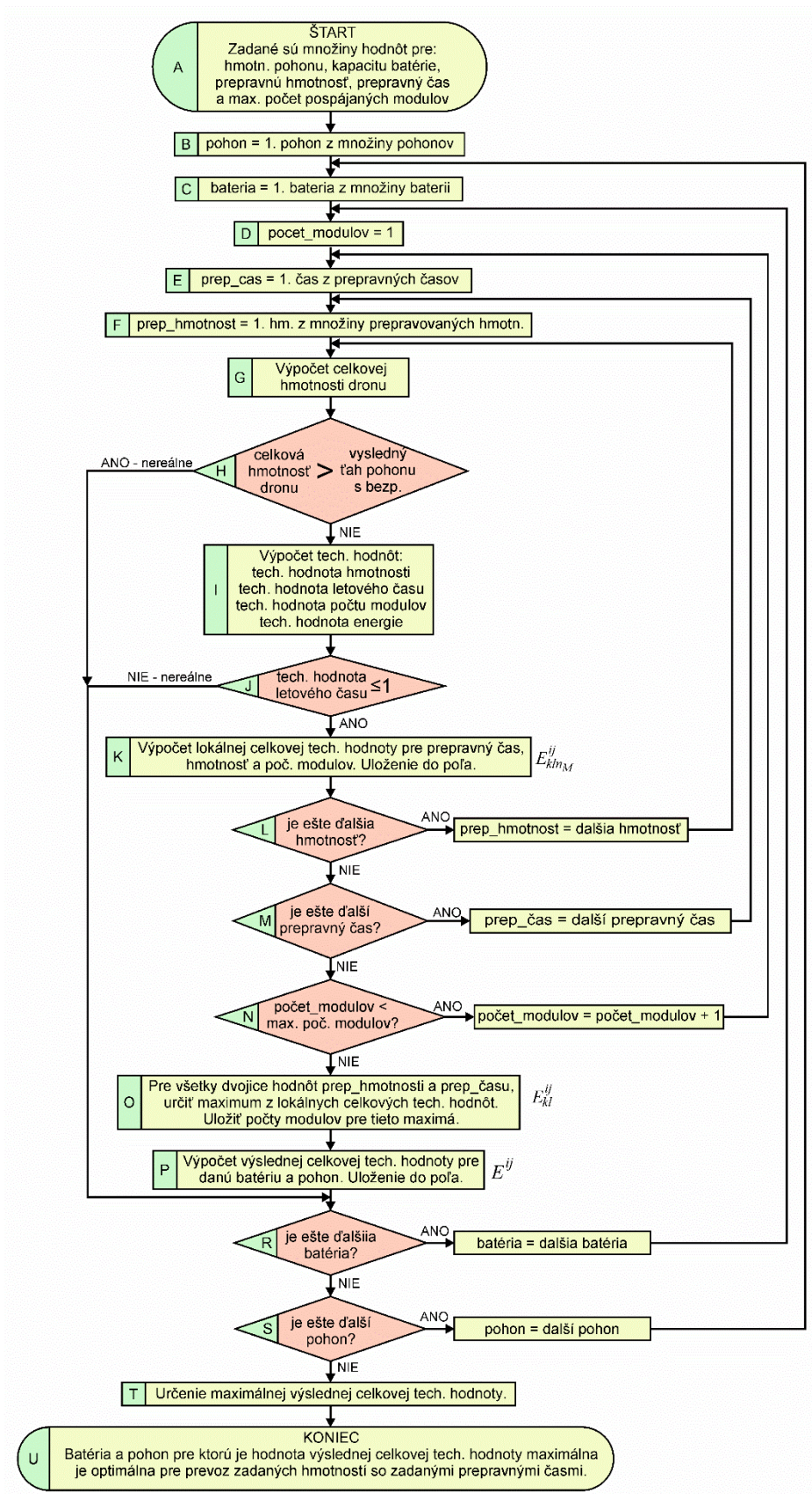
Tab. 3 Štatistická analýza pomeru ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva

Váha pohonného ústrojenstva [g]	Doporučená veľkosť vrtule	Ťah vrtule pri maximálnych otáčkach motora [g]	Pomer ťahu k hmotnosti
63,7	8*6	2150	33,75
48	6*4,5	1800	37,5
41	6*4,5	1600	39,02
270	22*7	10000	37,04
60	7*4,5	2100	35
35	5,5*4	1349	38,54
52	6*5,5	1700	32,69
80	9*4,5	2760	34,5
37	5*4,5	1400	37,84
20	4*4	700	35

Výsledkom štatistickej analýzy na celkovom počte 100 skúmaných vzoriek bateriek je aritmetický priemer konštanty ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva, ktorý je $Am_{ktm} = 36,82$. Táto výsledná hodnota sa bude ďalej používať v optimalizačných výpočtoch pomocou programu MATLAB.

4.3 Popis zvoleného výpočtu optimálnej konfigurácie pohonu UAV pre zadané časy letu a prepravovanú záťaž – pomocou vývojového diagramu

Pre lepšie pochopenie optimalizačného procesu posluží vývojový diagram, ktorý je možné vidieť na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..** Pre detailnejšiu analýzu a prehľadnejšie vysvetlenie je každý jeho krok označený písmenom.



Obr. 2 Vývojový diagram optimalizácie

Krok A: V tomto kroku sa vychádzalo z toho, že sú k dispozícii batérie s kapacitou CB_i v určenom rozsahu a pohon pre modul s hmotnosťou MP_j , tiež z určitého rozsahu. Takéto moduly je možno spolu spájať až do určitého počtu n_{Mmax} .

Ďalej sú určené prepravované hmotnosti PM_k a prepravné časy PT_l . Prepravné časy sú nezávislé na prepravovanej hmotnosti. Optimálne riešenie pohonu je také, pri ktorom sa dosiahne čo najvyššia celková technická hodnota pre všetky kombinácie prepravovanej hmotnosti a prepravovaného času. Zadájú sa parametre:

- kapacity batérie $CB = \{CB_1, CB_2, \dots, CB_{n_{CB}}\}$, n_{CB} je počet testovaných batérií,
- pohon s hmotnosťou $MP = \{MP_1, MP_2, \dots, MP_{n_{TP}}\}$, n_{TP} je počet testovaných pohonov,
- počet spájaných modulov n_M , $n_M = 1 \dots n_{Mmax}$, n_{Mmax} je maximálny počet spájaných modulov,
- prepravované hmotnosti $PM = \{PM_1, PM_2, \dots, PM_{n_{PM}}\}$, n_{PM} je počet prepravovaných hmotností,
- prepravné časy $PT = \{PT_1, PT_2, \dots, PT_{n_{PT}}\}$, n_{PT} je počet prepravných časov.

Krok B: Vyberie sa prvý pohon MP_1 z množiny pohonov $MP_{n_{TP}}$.

Krok C: Vyberie sa prvá kapacita batérie CB_1 z množiny batérií $CB_{n_{CB}}$.

Krok D: Vyberie sa prvý počet spájaných modulov $n_M = 1$, z množiny modulov $n_M = 1 \dots n_{Mmax}$.

Krok E: Vyberie sa prvý prepravný čas PT_1 z množiny prepravných časov $PT_{n_{PT}}$.

Krok F: Vyberie sa prvá prepravovaná hmotnosť PM_1 z množiny prepravovaných hmotností $PM_{n_{PM}}$.

Krok G: V tomto kroku je nutné vypočítať celkovú hmotnosť UAV, vrátane prepravovanej hmotnosti.

Vypočíta sa hmotnosť jedného modulu:

$$mM^{ij} = m_{base} + MB_i + MP_j \quad (6)$$

Kde: MB_i - hmotnosť batérie pre jeden modul:

$$MB_i = \frac{CB_i}{k_{MB}} \quad (7)$$

Kde: k_{MB} - koeficient na prepočet kapacity batérie na hmotnosť,

m_{base} - hmotnosť základných častí modulu.

Vypočíta sa hmotnosť celého UAV aj s prepravovanou hmotnosťou:

$$mD^{ij} = n_M \cdot mM^{ij} + PM_k + m_{arm}(n_M - 1) \quad (8)$$

Kde: m_{arm} - hmotnosť spojovacieho ramena.

Krok H: Skontroluje sa či je ťah dostatočný na to, aby bolo UAV schopné letu. Ak pre danú kombináciu kapacity batérie a hmotnosti pohonu CB_i a MP_j je splnená podmienka:

$$mD^{ij} > k_{Bzp} \cdot TP_j \quad (9)$$

Kde: k_{Bzp} - koeficient bezpečnosti,

TP_j - ťahová sila pohonu:

$$TP_j = k_{TP} \cdot MP_j \quad (10)$$

Kde: k_{TP} – koeficient pomeru ťahu a hmotnosti pohonného ústrojenstva.

tak tato kombinácia CB_i a MP_j sa v ďalšom výpočte už neuvažuje. Pre túto kombináciu nie je možné docieľiť, aby všetky kombinácie prepravovanej hmotnosti a prepravného času boli realizovateľné. Optimalizácia sa presunie do kroku R. Ak táto podmienka nie je splnená, pokračuje sa krokom I.

Krok I: Výpočet technických hodnôt:

technická hodnota počtu modulov EnM^{ij} :

$$EnM^{ij} = \frac{1}{n_M} \quad (11)$$

technická hodnota energie Ee_l^{ij} :

$$Ee_l^{ij} = \frac{mD^{ij} \cdot RT^{ij}}{n_M \cdot CB} \quad (12)$$

technická hodnota hmotnosti Em_k^{ij} :

$$Em_k^{ij} = \frac{PM_k}{mD^{ij}} \quad (13)$$

technická hodnota letového času Et_l^{ij} :

$$Et_l^{ij} = \frac{PT_l}{RT^{ij}} \quad (14)$$

Krok J: Skontroluje sa, či reálna doba letu je dostatočná na to, aby pokryla zadanú dobu letu.

Vypočíta sa reálna doba letu pre zvolenú kapacitu batérie a pohon.

$$RT^{ij} = \frac{n_M \cdot CB_i}{k_{BT} \cdot mD^{ij}} \quad (15)$$

Skontroluje sa podmienka uskutočniteľnosti letu - prepravný čas musí byť menší alebo rovný ako reálna doba letu daná kapacitou batérie:

$$Et_l^{ij} \leq 1 \quad (16)$$

Ak podmienka nie je splnená, tak kombinácia CB_i a MP_j sa v ďalšom výpočte už neuvažuje. Optimalizácia sa presunie do kroku R. Ak táto podmienka je splnená, pokračuje sa krokom K.

Krok K: Výpočet lokálnej celkovej technickej hodnoty pre daný prepravný čas, prepravovanú hmotnosť, počet modulov. Táto hodnota sa uloží ďalej do poľa.

Lokálna celková technická hodnota E_{klm}^{ij} sa vypočíta takto:

$$E_{klm}^{ij} = V_{Enm} \cdot EnM^{ij} + V_{Ee} \cdot Ee_l^{ij} + V_{Em} \cdot Em_k^{ij} + V_{Et} \cdot Et_{kl}^{ij} \quad (17)$$

Kde: V_{Enm} - váha technickej hodnoty počtu modulov,

V_{Ee} - váha technickej hodnoty energie,

V_{Em} - váha technickej hodnoty hmotnosti,

V_{Et} - váha technickej hodnoty letového času.

Krok L: Skontroluje sa, či ešte je k dispozícií ďalšia prepravovaná hmotnosť.

Ak je ďalšia prepravovaná hmotnosť ešte k dispozícií, tak sa cyklus vráti do kroku F, avšak vyberie sa ďalšia prepravovaná hmotnosť z množiny $PM_{n_{PM}}$. Ak už boli z množiny $PM_{n_{PM}}$ vybrané všetky prepravované hmotnosti, pokračuje sa krokom M.

Krok M: Skontroluje sa, či je ešte k dispozícií ďalší prepravný čas.

Ak je ďalší prepravný čas ešte k dispozícií, tak cyklus sa vráti do kroku E a vyberie sa ďalší prepravný čas z množiny $PT_{n_{PT}}$. Ak už boli z tejto množiny všetky prepravné časy vybrané, pokračuje sa krokom N.

Krok N: Skontroluje sa, či je ešte k dispozícií ďalší počet modulov.

Ak je ďalší počet modulov ešte k dispozícií, tak sa cyklus vráti späť do kroku D a vyberie ďalší nasledujúci počet modulov z množiny $n_M = 1 \dots n_{Mmax}$. Ak už boli aj z tejto množiny všetky počty modulov otestované, pokračuje sa krokom O.

Krok O: Pre všetky dvojice hodnôt prepravovaných hmotností a prepravných časov sa určí maximum z lokálnych celkových technických hodnôt E_{klm}^{ij} . Pre tieto maximá sa uložia počty modulov, pri ktorých boli maximá dosiahnuté.

$$E_{kl}^{ij} = \max \{E_{klm}^{ij}\}, n_M = 1 \dots n_{Mmax} \quad (18)$$

Krok P: Vypočíta sa výsledná celková technická hodnota E^{ij} pre danú batériu a daný pohon. Táto hodnota sa následne uloží do poľa.

$$E^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{PM}} \sum_{l=1}^{n_{PT}} E_{kl}^{ij} \quad (19)$$

Krok R: Skontroluje sa, či je ešte k dispozícii ďalšia kapacita batérie. Ak je ďalšia kapacita batérie ešte k dispozícii, cyklus sa vráti do kroku C a vyberie ďalšiu kapacitu batérie z množiny $CB_{n_{CB}}$. Ak už boli vybrané všetky prvky z tejto množiny, pokračuje sa krokom S.

Krok S: Skontroluje sa, či je k dispozícii ešte ďalší pohon. Ak je ďalší pohon ešte k dispozícii, cyklus sa vráti do kroku B a vyberie ďalší pohon z množiny $MP_{n_{TP}}$. Ak už boli vybrané všetky prvky z tejto množiny, pokračuje sa krokom T.

Krok T: Určenie maximálnej výslednej celkovej technickej hodnoty.

$$E = \max \{E_{n_M}^{ij}\}, n_M = 1..n_{Mmax} \quad (20)$$

Krok U: Vypíše sa batéria a pohon pre ktorú je hodnota výslednej celkovej technickej hodnoty maximálna. Táto hodnota batérie a pohonu je optimálna pre prevoz zadaných prepravovaných hmotností so zadanými prepravnými časmi, pri počte modulov ktoré sa vypíšu.

4.4 Hodnotenie konštrukčných riešení dvojbodovým spôsobom

Ako najvhodnejší spôsob nájdenia vhodného konštrukčného riešenia pre nájdenie optima, bol v prípade modulárneho UAV zvolený dvojbodový spôsob hodnotenia. Bol teda zvolený zoznam sledovaných parametrov, takzvaných technických hodnôt. V tomto konkrétnom prípade to boli ,už spomenuté, 4 sledované technické hodnoty:

- technická hodnota energie Ee_l^{ij} ,
- technická hodnota hmotnosti Em_k^{ij} ,
- technická hodnota letového času Et_l^{ij} ,
- technická hodnota počtu modulov EnM^{ij} .

Okrem zvolenia zoznamu sledovaných parametrov musí byť pri dvojbodovom spôsobe hodnotenia stanovená aj dôležitosť, váha jednotlivých atribútov. Celková technická hodnota konštrukcie je teda daná vzťahom:

$$X'' = \sum_{i=1}^n p_i \cdot v_i \quad (21)$$

- Kde:
- X'' je lokálna celková technická hodnota konštrukcie,
 - $p_1, p_2, \dots, p_n$ je bodové ohodnotenie parametrov, jednotlivých vlastností,
 - $v_1, v_2, \dots, v_n$ je koeficient dôležitosti, váhy jednotlivých atribútov,
 - n je počet hodnotených atribútov.

V danom prípade sa vlastnosti a parametre UAV ohodnotia adekvátnym počtom bodov, ktoré sa vypočítajú na základe už spomenutých vzorcov (11,12,13,14) pomocou programu MATLAB. Na základe pridelených koeficientov dôležitosti ,váh, sa pomocou programu MATLAB vypočíta celková technická hodnota podľa už konkrétneho vzorca (17).

4.5 Výsledky optimalizácie UAV v programe Matlab

Táto kapitola sa zaoberá odprezentovaním dosiahnutých výsledkov. Celý proces optimalizácie prebiehal v programe MATLAB. V tomto programe boli na základe vstupných parametrov, ktoré boli podrobne opísané v predchádzajúcich kapitolách, vykonané výpočty a analýzy na nájdenie najvhodnejšej konfigurácie UAV.

4.5.1 Detailnejšie rozanalyzovanie štatistických údajov

Na to, aby boli dosiahnuté čo najvhodnejšie riešenie, je potrebné mať čo najviac vstupných údajov. Je možné vidieť viacero vstupných informácií ohľadom percentuálneho zastúpenia potreby prepravy materiálu konkrétnych hmotností. Je tam možné nájsť tieto informácie od viacerých spoločností. Nie je však z optimalizačného hľadiska efektívne urobiť zariadenie, UAV, ktoré by zohľadňovalo všetky tieto vstupné informácie. Nakoľko však ide o dosiahnutie čo najlepšieho riešenia pre určitú konkrétnu situáciu, ako hlavné vstupné údaje boli zvolené údaje od spoločnosti Groupe PSA. Dôvodom je to, že tieto vstupné informácie sú zo všetkých najdetailnejšie. Je možné vidieť dôslednú štatistiku, ktorú má táto spoločnosť zozbieranú.

Program je vytvorený tak aby mu ako vstup mohli slúžiť potrebné prepravované hmotnosti a potrebné dolety akejkolvek spoločnosti. Tým pádom sa zabezpečí konfigurácia na mieru.

4.5.2 Výsledky optimalizácie

Ako výsledok tejto štatistiky je najvhodnejšia batéria, najvhodnejšie pohonné ústrojenstvo a počet modulov v každom bode. V tomto prípade je to batéria, ktorá ma kapacitu 378 Wh spolu s pohonným ústrojenstvom hmotnosti 430g a ťahu 15 832g. Tieto vstupné parametre dosiahli najväčšiu celkovú technickú hodnotu pre všetky prepravované hmotnosti. Je možné vidieť aj programom vyhodnotené najideálnejšie riešenie, z hľadiska počtu modulov na prepravu určitej hmotnosti tovaru, v závislosti od doby letu.

V nasledujúcej tabuľke, Tab. 4, je možné vidieť počet modulov potrebných na prepravu, pri danej baterke a pohonnom ústrojenstve. V tabuľke sú vybrané hraničné hodnoty časov.

Tab. 4 Optimálne počty modulov

		Doba letu prepravy (minúty)									
		7 min	9 min	11 min	13 min	15 min	17 min	19 min	21 min	23 min	25 min
		Počet modulov									
Hmotnosť prepravovaného nákladu (kg)	Do 1kg	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1 až 3kg	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	3 až 5kg	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3
	5 až 10kg	1	1	1	2	2	2	3	4	5	6

Z tabuľky vyplýva, že pre náklady do 1 kg je vždy potrebný iba jeden modul bez ohľadu na dobu letu. To naznačuje, že jeden modul je dostatočne výkonný a má dostatočnú kapacitu batérie na zvládnutie prepravy ľahkých nákladov po celú uvedenú dobu letu.

Pre náklady od 1 kg do 3 kg je väčšinou potrebný jeden modul pre lety do 21 minút. Pre dlhšie lety (23 a 25 minút) sú potrebné dva moduly. To naznačuje, že jeden modul má dostatočnú kapacitu na kratšie lety, ale pre dlhšie lety už je potrebné pridať ďalší modul, aby sa zabezpečila dostatočná energetická rezerva.

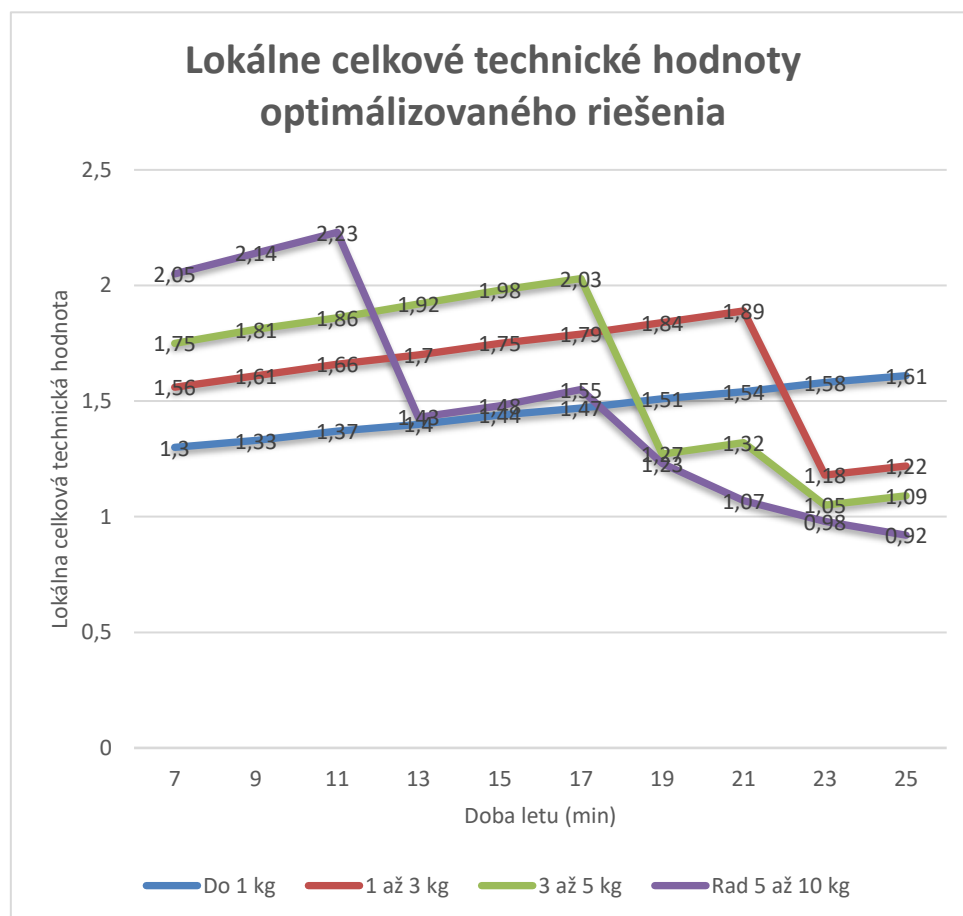
Pre náklady od 5 kg do 10 kg je potrebný jeden modul len pre veľmi krátke lety (7 až 11 minút). Pre dlhšie lety (13 až 25 minút) sú potrebné dva až šesť modulov. Počet modulov sa výrazne zvyšuje s predlžujúcou sa dobou letu, čo naznačuje, že pre ťažšie náklady a dlhšie lety je potrebné výrazne zvýšiť energetickú kapacitu dronu.

Tabuľka ukazuje, že systém modulárnych dronov je veľmi flexibilný a môže byť prispôsobený rôznym požiadavkám na hmotnosť nákladu a dobu letu. Systém umožňuje optimalizovať energetické požiadavky pridávaním modulov podľa potreby, čo je efektívne z hľadiska riadenia energie a prevádzky dronov. Praktické využitie tohto systému v priemysle znamená, že spoločnosti môžu efektívne riadiť prepravu rôznych nákladov prispôbovaním počtu modulov podľa aktuálnych potrieb, čím sa zvýši efektivita a znížia náklady na energiu. Tabuľka tiež demonštruje škálovateľnosť systému, kde je možné jednoducho zväčšovať kapacitu dronu podľa potreby bez nutnosti kompletnej výmeny celého zariadenia. Tab. 5, spolu aj s výsledným pohonným ústrojenstvom a aj konkrétnou batériou, poskytuje kľúčové údaje pre návrh modulu autonómneho lietajúceho prostriedku.

Tab. 5 Lokálne celkové technické hodnoty jednotlivých buniek

		Doba letu prepravy (min)									
		7 min	9 min	11 min	13 min	15 min	17 min	19 min	21 min	23 min	25 min
Hmotnosť prepravovaného nákladu (kg)	Do 1kg	1,30	1,33	1,37	1,4	1,44	1,47	1,51	1,54	1,58	1,61
	1 až 3kg	1,56	1,61	1,66	1,7	1,75	1,79	1,84	1,89	1,18	1,22
	3 až 5kg	1,75	1,81	1,86	1,92	1,98	2,03	1,27	1,32	1,05	1,09
	5 až 10kg	2,05	2,14	2,23	1,43	1,48	1,55	1,23	1,07	0,98	0,92

V Tab. 5 je možné vidieť lokálne celkové technické hodnoty v konkrétnych skúmaných nosnostiach a časoch. Prehľadnejšie je ich zároveň možné vidieť aj na Obr. 3. Tieto hodnoty prislúchajú optimálnej baterke a optimálnemu pohonu.



Obr. 3 Lokálne celkové technické hodnoty optimalizovaného riešenia

Pri detailnejšom pohľade a porovnaní Tab. 4 spolu s Tab. 5, je možné vidieť aký veľký vplyv má technická hodnota počtu modulov EnM^{ij} . Najzávažnejšie je to vidieť pri hmotnosti nákladu 3 až 5 kg. Pri dobe letu 17 minút, je na prepravu potrebný len jeden modul, môžeme tak sledovať veľkú lokálnu celkovú technickú hodnotu, až 2,03. Pri dobe letu 19 minút však už je potrebné, aby sa pridal do UAV aj druhý modul. Tým táto hodnota rapídne poklesne až na 1,27. Podobné skoky hodnôt je možné sledovať aj v iných lokálnych bodoch, pri zmene počtu modulov.

Ako je možné vidieť, najefektívnejší lokálny bod je pri prepravovanej hmotnosti 5 až 10 kg a dobe letu 11 minút. Je to spôsobené tým, že pri tomto bode je dron schopný pracovať stále s jedným modulom. Takže má vysokú technickú hodnotu počtu modulov EnM^{ij} , na základe toho má aj vysokú technickú hodnotu hmotnosti Em_k^{ij} , čiže pomer hmotnosti prepravovaného materiálu k celkovej hmotnosti UAV.

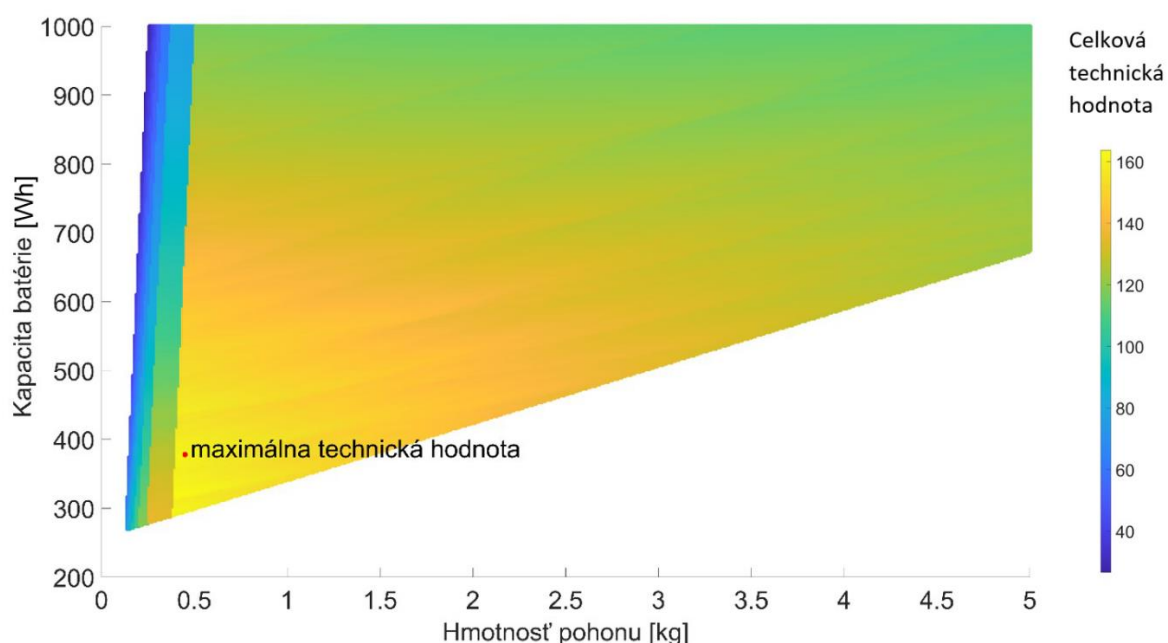
4.5.3 Detailnejšia analýza výsledkov optimalizácie

Okrem tabuľky s najefektívnejším počtom modulov pre výslednú baterku a pohonné ústrojenstvo je zaujímavý aj celkový pohľad na graf celkovej technickej hodnoty celého skúmaného spektra možností.

Tento graf, Obr. 44, teda poskytuje vizuálny prehľad o optimalizácii. Graf zobrazuje výslednú celkovú technickú hodnotu celého dronu zloženého z optimálneho počtu modulov v každom bode. V každom bode, teda v každej hodnote batérie a pohonného ústrojenstva, je na základe vstupných údajov zvolený optimálny počet modulov daného bodu (z hľadiska celkovej technickej hodnoty). Táto maximálna celková technická hodnota E , je potom znázornená v grafe. V popise grafu je možné vidieť hmotnosť pohonu, ktorá je prepočítaná na jeden modul. V popise je taktiež možné vidieť aj kapacitu baterky, ktorá je taktiež prepočítaná na jeden modul.

V miestach kde je farba najžiarivejšia, najviac žltá, sa dosahujú vyššie celkové výsledné technické hodnoty, E^{ij} . A naopak, v miestach kde je farba najtmavšia, najtemnejšia, sa dosahujú nízke E^{ij} .

Okrem toho že graf ukazuje, že maximálna celková výsledná technická hodnota E , bola dosiahnutá pri kapacite batérie okolo 378 Ah a hmotnosti pohonného ústrojenstva približne 0,43 kg, je možné vidieť ešte viacero zaujímavých charakteristík.



Obr. 4 Celková výsledná technická hodnota v celom skúmanom spektre

Ako je možné vidieť, so zvyšujúcou váhou pohonného ústrojenstva (zároveň sa zvyšuje aj ťah) sa E^{ij} znižuje. Toto nastáva však až od určitej hranice, ktorá zodpovedá hmotnosti pohonu približne 0,25 až 0,3 kg. Dôvod že sa E^{ij} znižuje je ten, že sa znižuje technická hodnota energie Ee_l^{ij} a znižuje sa taktiež aj technická hodnota hmotnosti Em_k^{ij} .

Pod touto hranicou (0,25 až 0,3 kg) je možné vidieť že E^{ij} prudko klesá. Tento pokles je spôsobený tým, že pri týchto konfiguráciách je ťah motorov taký malý, že okrem svojej vlastnej hmotnosti sú schopné uniesť veľmi malú pridanú hmotnosť. Tým pádom sa v tomto bude musieť pospájať veľké množstvo modulov (niekedy až cez 20 ks) aby bolo UAV vôbec schopné prepraviť náklady všetkých zadaných nosností. Dôvod prečo má teda E^{ij} v tomto bode takú malú hodnotu je technická hodnota počtu modulov EnM^{ij} .

Od určitej hodnoty je možné pozorovať, že so zväčšujúcou sa baterkou sa E^{ij} znižuje. Tento jav je spôsobený tým, že so zväčšením kapacity baterky sa rapídne zväčšuje aj hmotnosť modulu. Vďaka tomu klesá technická hodnota hmotnosti Em_k^{ij} , technická hodnota letového času Et_l^{ij} a technická hodnota energie Ee_l^{ij} .

5. KONŠTRUKCIA

V nasledujúcej časti sa kladie dôraz najprv na vyriešenie najnamáhanejších uzlov. Keď budú vyriešené charakteristiky a vlastnosti týchto uzlov, môže sa zostavovať UAV ako celok. Medzi tieto časti patrí:

- prepojovacie rameno,
- rameno vrtule,
- uchytenie nákladu.

5.1 Konštrukcia prepojovacieho ramena

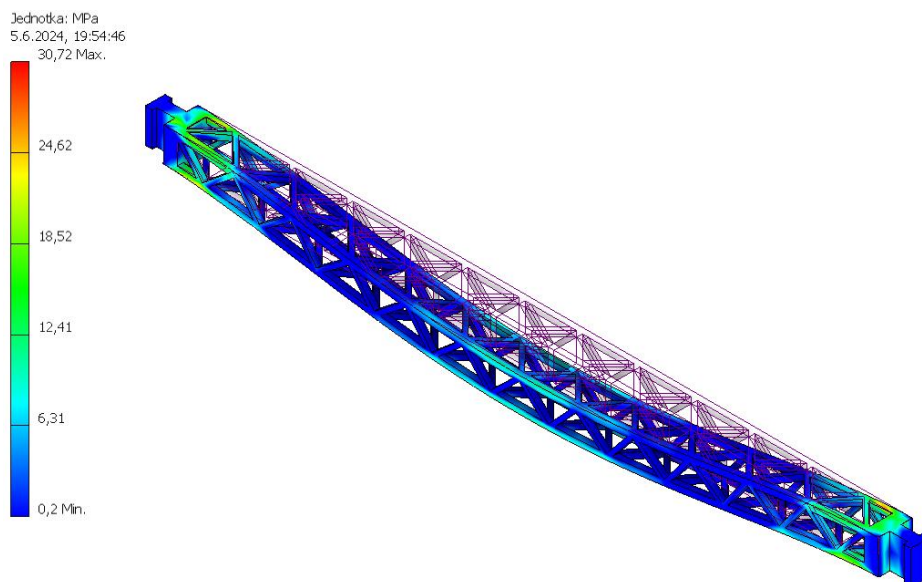
Prepojovacie rameno je najnamáhanejšou časťou modulárneho systému UAV. Je to rameno, ktoré slúži na prepojenie modulov. Umožňuje tak vyskladať modulárne UAV s takmer neobmedzeným počtom modulov. Pri viacerých možnostiach konfigurácií UAV nie je vždy zaručené že ťažisko celého UAV bude vždy uprostred. Je to spôsobené tým, že prepravovaný náklad nebude možné pri každom prípade umiestniť do ťažiska UAV. Prepojovacie rameno je navrhnuté tak, aby zvládalo vysoké zaťaženie a namáhanie, ktoré vzniká pri spájaní viacerých modulov. Hlavné funkcie prepojovacieho ramena sú:

- **Mechanické prepojenie modulov:** Spojenie jednotlivých modulov UAV, ktoré môžu obsahovať rôzne komponenty ako batérie, motory, vrtule a ďalšie vybavenie.
- **Zabezpečenie stability a rovnováhy:** Pomocou prepojovacieho ramena sa dosahuje potrebná stabilita a rovnováha celého systému, čo je kľúčové pre bezpečný a efektívny let.
- **Prenos síl a momentov:** Rameno musí prenášať sily a momenty medzi modulmi, čím zabezpečuje integritu konštrukcie a spoľahlivú prevádzku UAV.
- **Modulárnosť systému:** Nutnosť čo najjednoduchšej zmontovateľnosti a rozmontovateľnosti, najlepšie bez skrutkových spojov.

Pri návrhu optimálneho tvaru a geometrických vlastností ramena bolo vychádzané so zariadení, pri ktorých sa vyskytujú podobné ramená, ktoré musia zvládnuť prenášať väčšie zaťaženia. Ako najrozšírenejším a pravdepodobne aj rozmerovo najväčším, príkladom je stavebný žeriav. Ďalším prípadom použitia podobných ramien sú 3D tlačiarne.

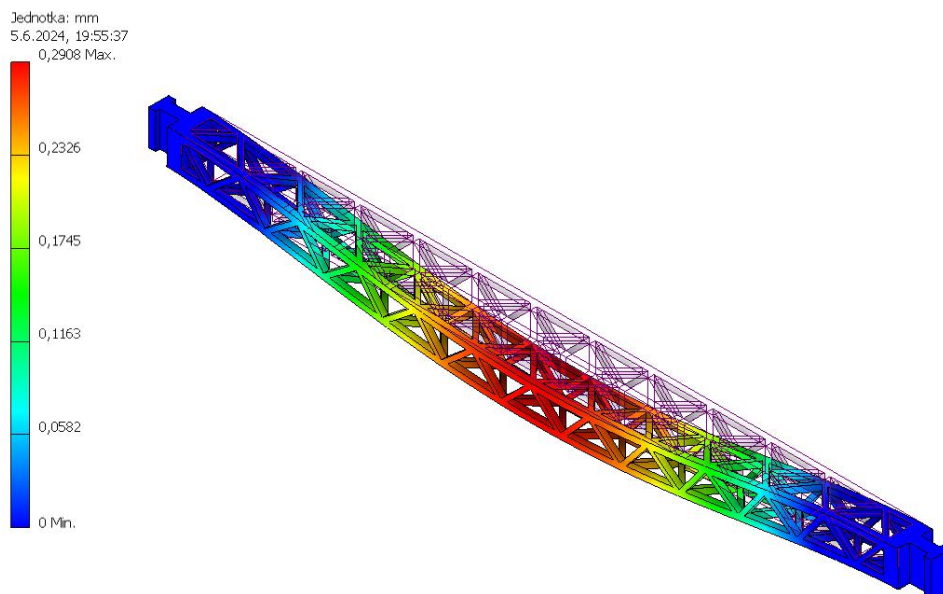
Navrhnuté prepojovacie rameno pre UAV, ktoré vychádza z predchádzajúcich výskumov na podobných zariadeniach, je kvôli svojej robustnosti ale aj zároveň svojej nízkej hmotnosti vytvorené zo zliatiny hliníku EN AW 6060. Tento materiál ma vysokú pevnosť v ťahu. Rameno má dĺžku 500 mm. Táto dĺžka je potrebná na to aby nedošlo ku kontaktu vrtúl jednotlivých modulov. Šírka ramena je 20 mm. Celková váha je 208g. Šírka ramena je 20mm. Celková váha je 208 g. Na nasledujúcich obrázkoch, Obr. 5 a Obr. 6, je možné vidieť napäťovú analýzu a analýzu posunutia, pri celovom zaťažení 400 N. Čo je maximálna

vypočítaná sila ktorá môže pôsobiť na rameno. Na obidvoch koncoch ramena je možné vidieť T ukončenie. Toto T ukončenie slúži na čo najjednoduchšiu zmontovateľnosť a rozmontovateľnosť celého modulárneho systému.



Obr. 5 MKP analýza napätia prepojovacieho ramena

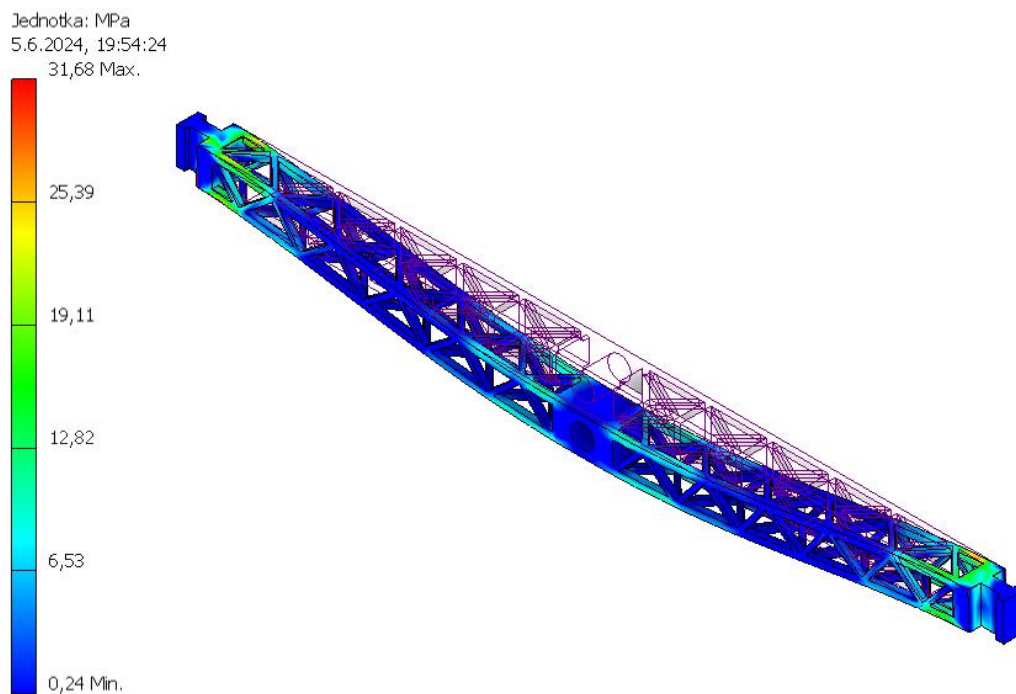
Materiál EN AW 6060 má medzu klzu 110 MPa. Napätia zistené v analýze (maximálne 30.72 MPa) sú výrazne pod touto hodnotou, čo naznačuje, že materiál je v bezpečných medziach a nedôjde k plastickej deformácii.



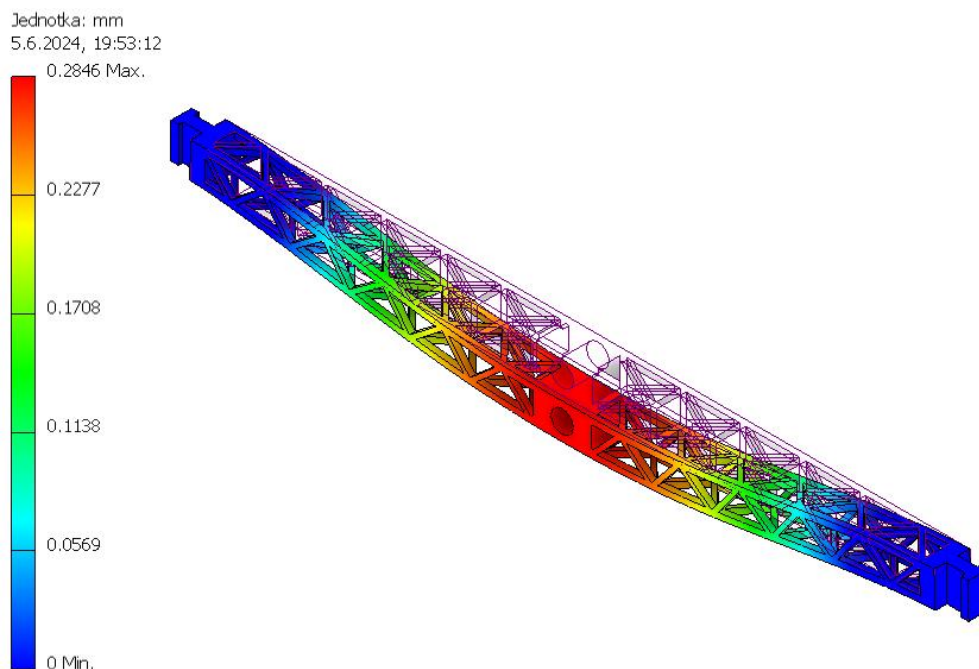
Obr. 6 MKP analýza posunutia prepojovacieho ramena

Výsledné hodnoty posunutia ukazujú, že rameno z EN AW 6060 sa správa stabilne a je vhodné pre použitie v modulárnych UAV aplikáciách, kde je dôležitá nízka hmotnosť a dostatočná pevnosť.

Nakoľko pri určitých konfiguráciách UAV nie je možné uchytiť prepravovaný náklad na jeden z jeho modulov, je nutné vyrobiť prepojovacie rameno ktoré má v sebe oko na uchytenie prepravovaného nákladu. Je to z toho dôvodu, že ťažisko UAV sa v určitých konfiguráciách nenachádza v žiadnom z jeho modulov. Na Obr. 7 je možné vidieť MKP analýzu napätia a na Obr. 8 je vidieť MKP analýzu posunutia.



Obr. 7 MKP analýza napätia prepojovacieho ramena s okom

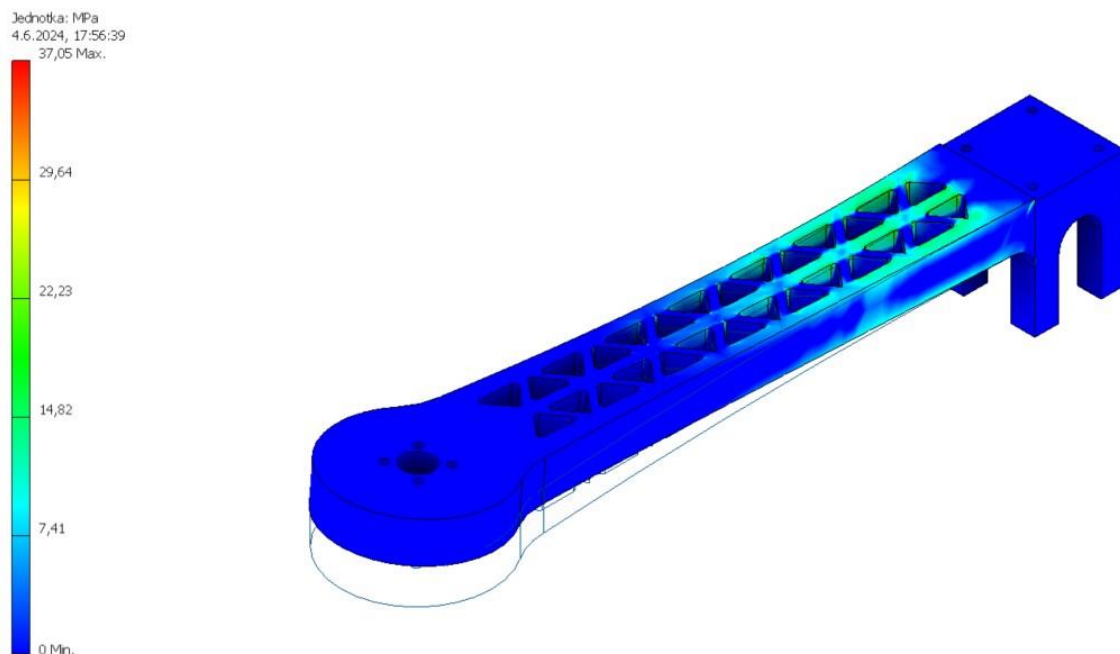


Obr. 8 MKP analýza posunutia prepojovacieho ramena s okom

Keď sa porovnajú výsledky MKP analýz prepojovacieho ramena a prepojovacieho ramena s okom, je možné vidieť iba malé rozdiely. V prepojovacom ramene s okom je možné vidieť väčšie maximálne napätia o 0,96 Mpa. Opačný trend je možné pozorovať pri analýze posunutí, kde je vidieť, že toto rameno má menšie maximálne posunutie o 0,0062 mm. Oba tieto rozdiely sú však minimálne. Rameno bolo nadimenzované tak, aby malo rovnakú váhu ako prepojovacie rameno. Z hľadiska skladovateľnosti je tak možné všetky prepojovacie ramená nahradiť prepojovacími ramenami s okom.

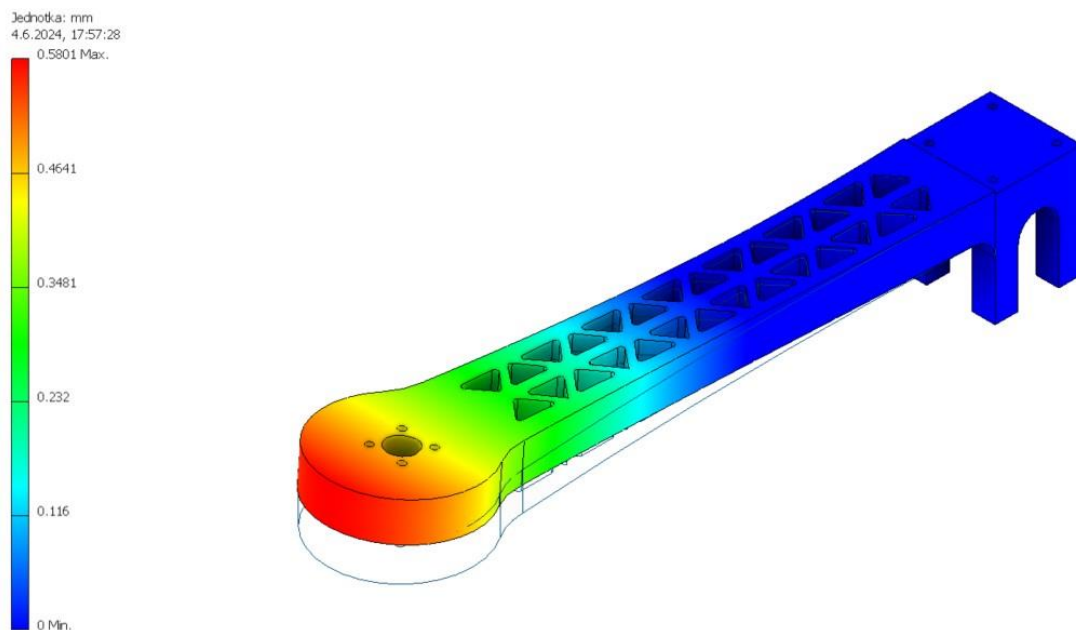
5.1 Konštrukcia ramena vrtule

Ďalšou, avšak menej namáhanou časťou UAV je rameno jednej vrtule. Je navrhnuté tak, aby zvládlo preniesť ťah vrtule. Rameno vrtule je na jednej strane ukončené dosadacími plochami pre upevnenie k telu. Nakoľko nie je potrebné, aby bol tento spoj rozoberateľný, bude to spojené pomocou skrutiek. Na druhej strane má rameno potrebné otvory na uchytenie motora. Na nasledujúcich obrázkoch, Obr. 9 a Obr. 10, je možné vidieť analýzu napätia a posunutia pri zaťažení ktoré zodpovedá ťahu vrtule 40 N.



Obr. 9 MKP analýza napätia ramena vrtule

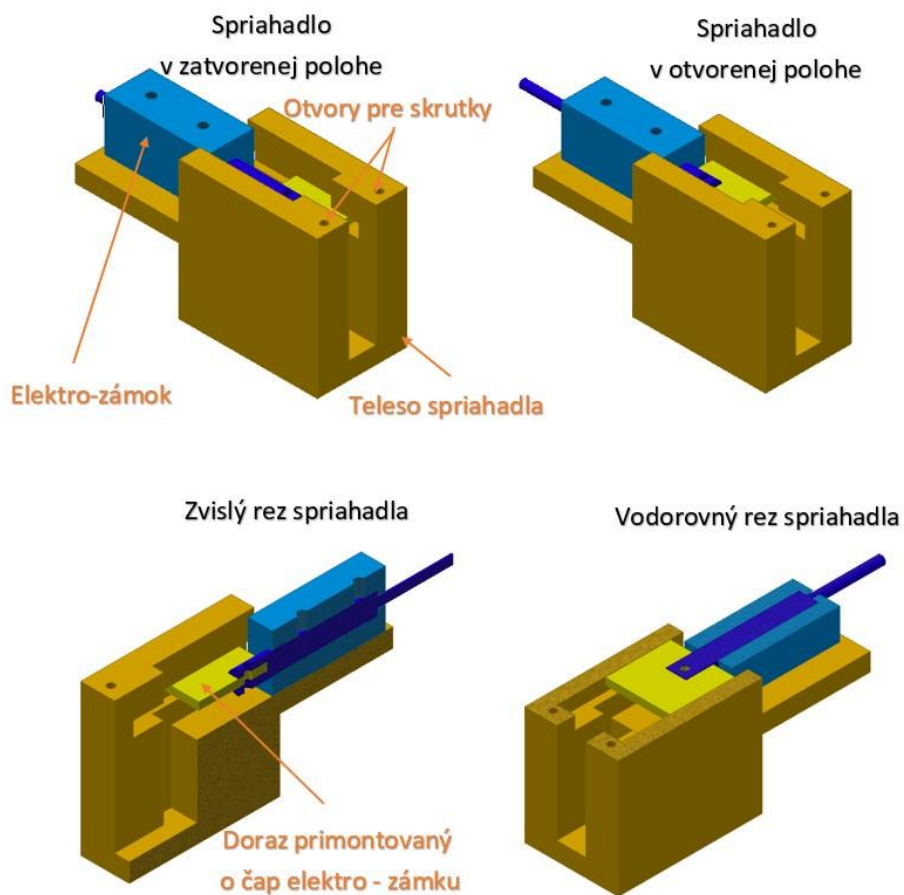
Rameno vrtule je vyrobené z POM-C plastu. Tento plast má medzu klzu 70 až 80 MPa. Napätia zistené v analýze (maximálne 37.05 MPa) sú výrazne pod touto hodnotou, čo naznačuje, že materiál je v bezpečných medziach a nedôjde k plastickej deformácii.



Obr. 10 MKP analýza posunutia ramena vrtule

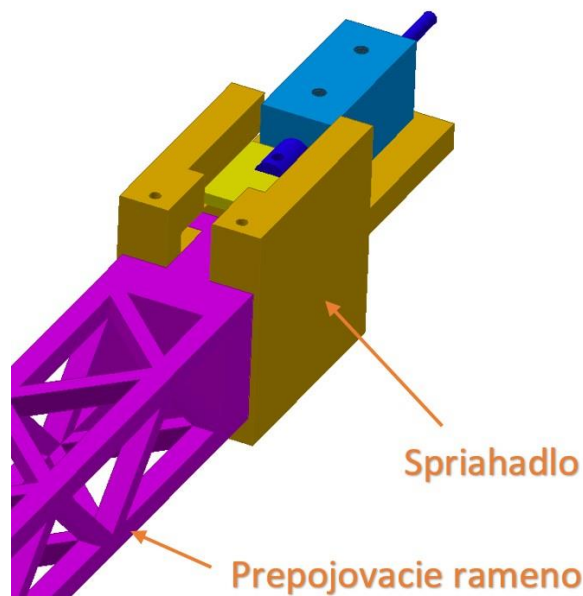
5.2 Konštrukcia spriahadla

Na to, aby bola zabezpečená jednoduchosť rozmontovateľnosti a zmontovateľnosti jednotlivých modulov, je nutné, aby sa jednotlivé moduly spájali pomocou prepojujúcich ramien bez nutnosti skrutkového spoja. Tento skrutkový spoj by totiž predlžil dobu zmontovateľnosti, čo by malo záporný vplyv na výhody celého modulárneho systému. Na to aby bol čas zmontovateľnosti a rozmontovateľnosti čo najkratší, bude slúžiť navrhnuté spriahadlo ktoré je možné vidieť na Obr. 11. Toto spriahadlo bude priskrutkované k telu modulu, čím sa zabezpečí jeho pevné ukotvenie k modulu.



Obr. 11 Detailné rozkreslenie spriahadla

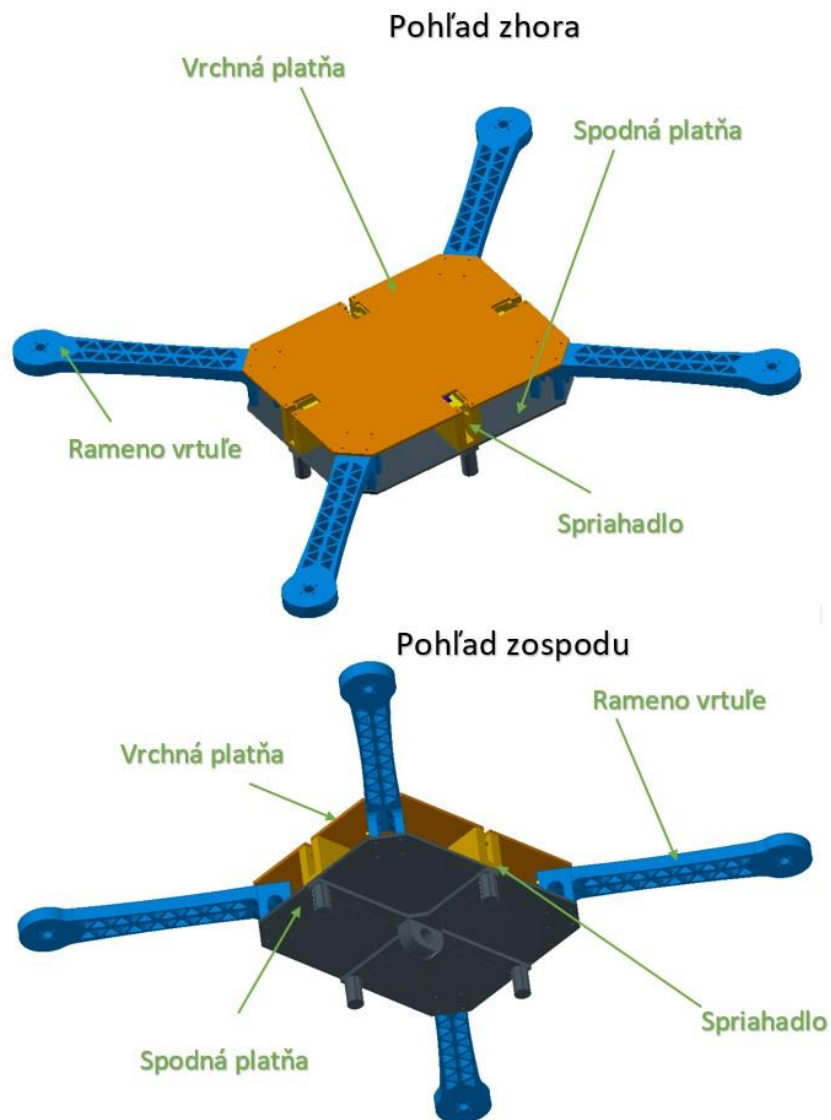
Spriahadlo sa skladá z elektro zámku, telesa spriahadla a dorazu. Spriahadlo je možné vidieť na Obr. 11 v otvorenej polohe, v tejto polohe je možné nasadiť do spriahadla prepojovacie rameno. Rameno sa následne zafixuje k spriahadlu tým, že doraz spolu s elektro zámkom sa presunú do zatvorenej polohy. Spriahadlo je vyrobené z rovnakého materiálu ako aj prepojovacie rameno. Je to hliníková zliatina EN AW 6060. Na Obr. 12 môžete vidieť prepojovacie rameno zasunuté do spriahadla. Spriahadlo je kvôli prehľadnosti obrázku v otvorenej polohe.



Obr. 12 Prepojovacie rameno zasunuté do spriahadla

5.3 Telo modulu

Telo modulu je časť, ktorá spája jednotlivé komponenty modulu. Sú k nemu priskrutkované 4 spriahadlá a 4 ramená vrtule. Nachádzajú sa na ňom aj všetky dôležité súčasti dronu, ako sú napríklad baterka, kontroler, kabeláž, regulátory, anténa Na Obr. 13 je možné vidieť telo modulu, ktoré pozostáva z vrchnej platne a spodnej platne ktoré sú do seba navzájom priskrutkované pomocou 4 ks spriahadiel a 4 ramien vrtule. Vrchná aj spodná platňa sú vytvorené z rovnakého materiálu, ktorým je POM-C. Vrchná a spodná platňa majú podobnú konštrukciu. Spodná platňa má oproti vrchnej navyše oko na uchytenie prepravovaného nákladu a nohy. Je taktiež možné vidieť že spodná platňa má pridané výstuže, vďaka ktorým sa lepšie prenesie zaťaženie prepravovaného nákladu priamo na prepojovacie ramená na iné moduly.



Obr. 13 Pohľad na telo modulu

5.1 Implementovanie výsledkov optimalizácie

Na základe výsledku optimalizácie je nutné navrhovaný systém pohonu a baterky implementovať do modulu.

Z výsledkov optimalizácie je možné vyčítať, že výsledný pohon jedného modulu má 0,43kg a ťah 15 832g.

$$T_{1e} = \frac{T_e}{n_p} \quad (22)$$

Kde: T_{1e} – ťah jedného motora spolu s vrtuľou [g],

T_e – ťah pohonného ústrojenstva [g],

n_p – počet vrtúľ.

$$m_{1e} = \frac{m_e}{n_p} \quad (23)$$

Kde: m_{1e} – hmotnosť jedného motora spolu s vrtuľou [g],

m_e – hmotnosť pohonného ústrojenstva [g],

n_p – počet vrtúľ.

Nakoľko celá optimalizácia je riešená pre kvadrokoptéru, výsledný ťah jedného motora spolu s vrtuľou bude $T_{1e} = 3958g$ a výsledná hmotnosť bude 107,5 g.

Z výsledkov optimalizácie je taktiež možné vyčítať kapacitu optimálnej batérie, ktorá je $C_{Wh} = 378 Wh$. Z následnej kapacity je možné späťne vypočítať jej hmotnosť podľa nasledujúceho vzorca.

$$m_b = \frac{C_{Wh}}{ED} \quad (24)$$

Kde: ED - Energetická hustota batérie [Wh/kg],

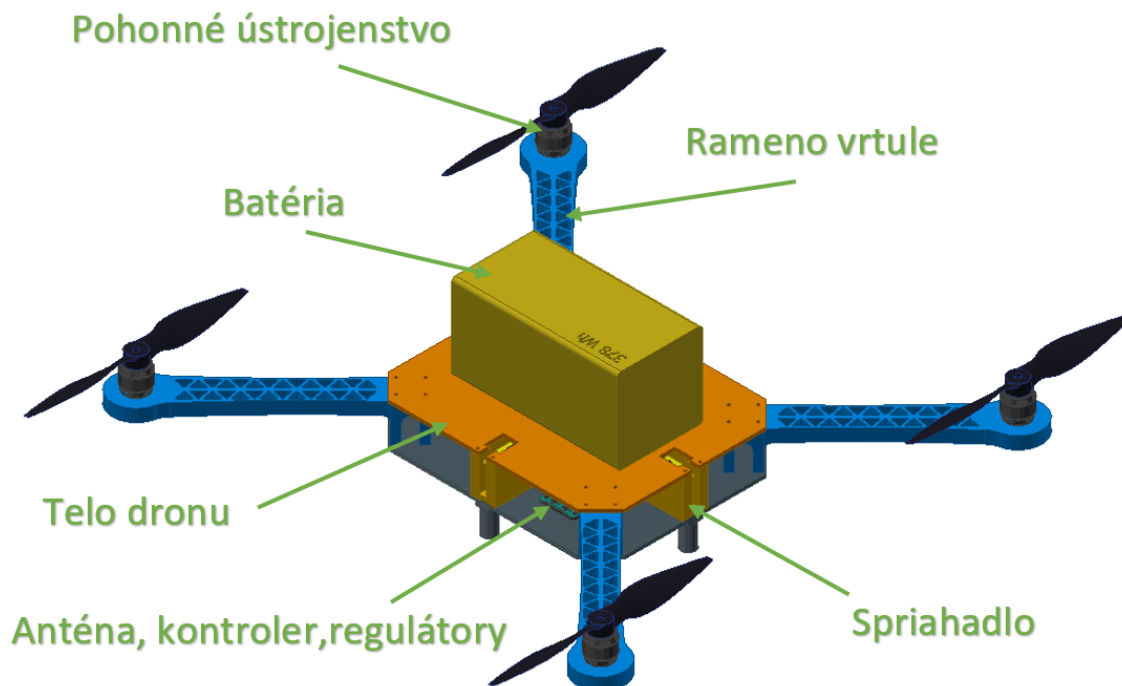
C_{Wh} - kapacita batérie [Wh],

m_b – hmotnosť batérie [kg].

Hmotnosť baterky je teda po dosadení 2,317 kg.

5.2 Optimálna konštrukcia 1 modulu

Na základe predchádzajúcich výpočtov a optimalizácie je vyskladaná finálna verzia modulu UAV. Túto finálnu verziu je možné vidieť na Obr. 14. Nachádza sa tu telo dronu spolu aj s 4 ramenami vrtule. Na každom ramene vrtule sa nachádza pohonné ústrojenstvo, ktoré je zložené s motora a vrtule. V tele dronu sa nachádzajú regulátory motorov, kontroler a anténa. Kabeláž na obrázku nie je možné vidieť z dôvodu prehľadnosti obrázku. Ďalej je na tomto obrázku možné vidieť spriahadlo na pripojenie prepojuvacieho ramena.



Obr. 14 Finálna verzia modulu UAV

5.3 Optimálna konštrukcia UAV

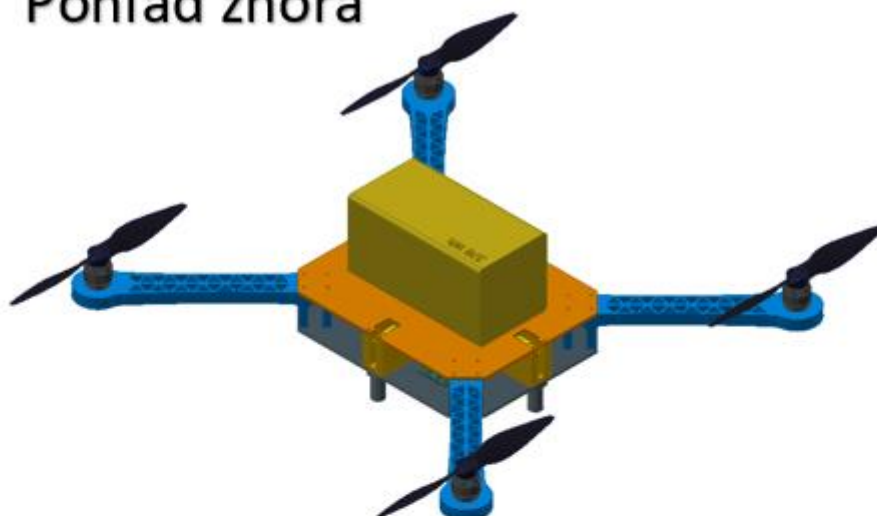
V tejto podkapitole sa budú prezentovať výsledky analýz a návrh optimálnej konštrukcie UAV, pričom sa zohľadnia výsledky z optimalizácie a aj MKP analýz.

5.3.1 Optimálna konštrukcia UAV – 1 modul

Na základe Tab. 4 je možné konštatovať, že súbor potrebných prepravných časov a hmotností prepravovaného nákladu má celkovo 40 zadanií (4 hmotnosti krát 10 prepravných časov).

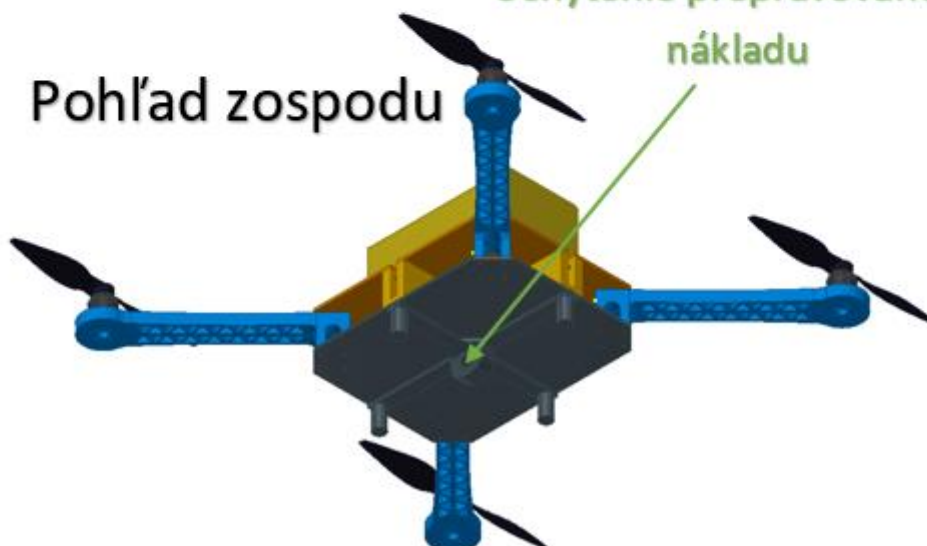
Z týchto celkových 40 zadanií je riešenie s 1 modulom vhodné až pre 27 zadanií, čo je pokrytie 67,5 %. Konkrétne je dron s jedným modulom, Obr. 15, schopný pokryť všetky zadania o hmotnosti prepravovaného nákladu do 1 kg. Ďalej je schopný pokryť zadania prepravovaného nákladu 1 kg až 3 kg až do doby letu 21 minút. Pri hmotnosti 3 kg až 5 kg, pokryje zadania do prepravovaného času 17 minút. Pri najťažších možných prepravných hmotnostiach, 5 až 10 kg, dron s 1 modulom zabezpečí prepravu do maximálneho letu prepravy 11 minút.

Pohľad zhora



Uchytenie prepravovaného
nákladu

Pohľad zospodu

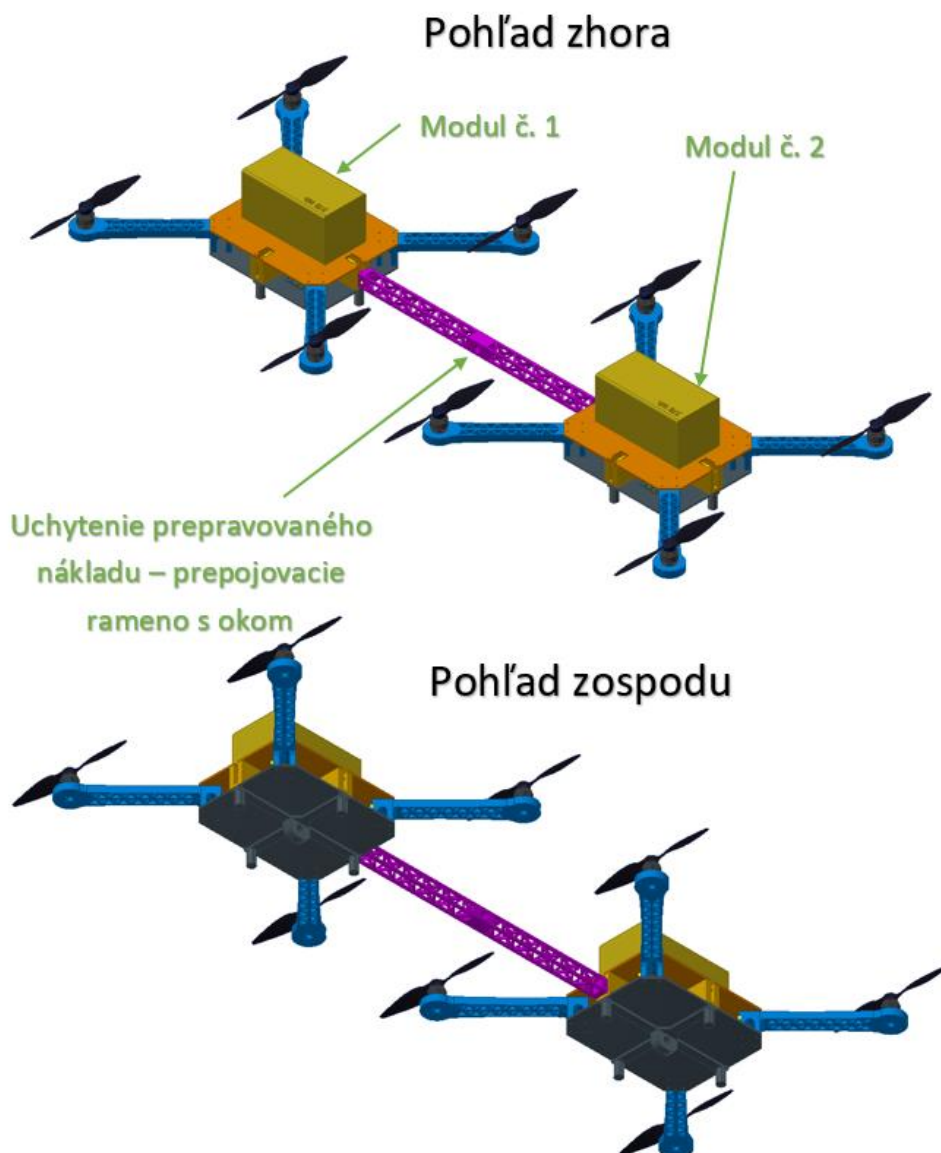


Obr. 15 3D model UAV s 1 modulom

Prepravovaný náklad je bezpečne uchytený pomocou uchyťavacieho oka, ktoré je navrhnuté tak, aby sa nachádzalo vo vodorovnom ťažisku modulu. V tomto prípade aj ťažisku celého UAV. Tento dizajn umožňuje, aby dron zostal stabilný počas letu, čím sa minimalizuje riziko nevyváženosti. Výhodou riešenia s jedným modulom je, že uchyťavacie oko je umiestnené optimálne pre rovnováhu a zaisťuje, že dron dokáže efektívne a bezpečne prepravovať náklad bez výrazných korekcií letu.

5.3.2 Optimálna konštrukcia UAV – 2 moduly

Ako je možné vidieť v Tab. 4, konfigurácia UAV s 2 modulmi je optimálna pre 17,5% zadaní. Jedná sa o dolet 23 až 25 minút pri prepravovanom náklade 1 až 3 kg, pri dolete 19 až 21 minút pri náklade 3 až 5 kg, dolet 13 až 17 minút pri náklade 5 až 10 kg. 3D Model UAV s 2 modulmi je možné vidieť na Obr. 16.

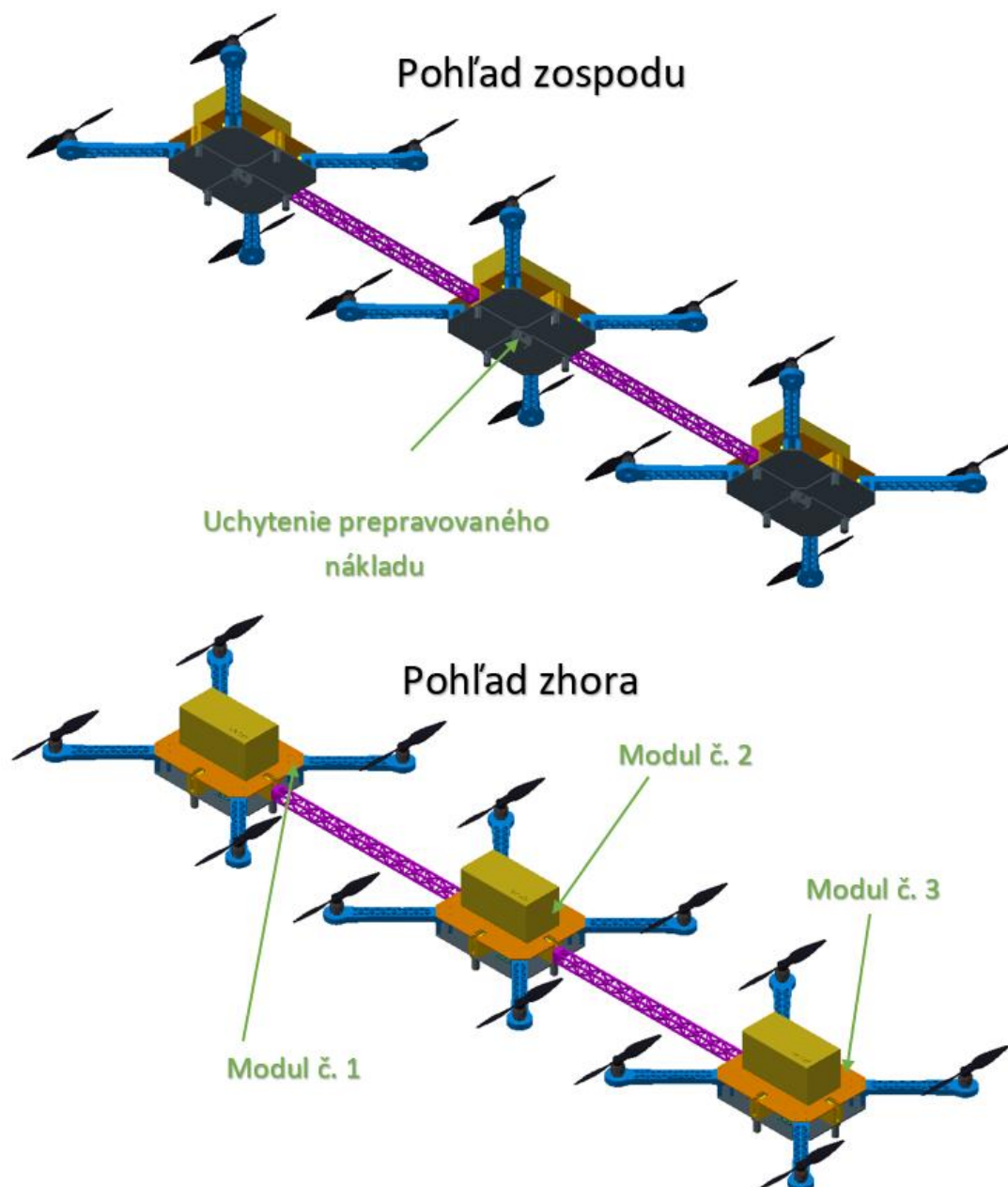


Obr. 16 3D model UAV s 2 modulmi

Keďže je už z 3D modelu zrejmé, že ťažisko dronu sa nebude nachádzať v jednom z jeho modulov, oká na uchytenie tovaru ktoré sa nachádzajú na module nie je možné použiť. Na to, aby bol prepravovaný tovar uchytený vo vodorovnom ťažisku, je použité prepojovacie rameno s okom.

5.3.3 Optimálna konštrukcia UAV – 3 moduly

Riešenie s dronom, ktorý pozostáva z 3 modulov pokryje z celkového počtu 40 zadání 3 zadania, túto informáciu je možné vyčítať z Tab. 4. Celkovo táto konfigurácia pokryje 7,5 % zadání. Pri detailnejšej analýze sú to zadania pri hmotnosti prepravovaného nákladu 3 až 5kg od dĺžky letu 23 minút do 25 minút. Okrem toho pokryje zadanie prepravy 5 až 10 kg po dobu letu 19 minút.

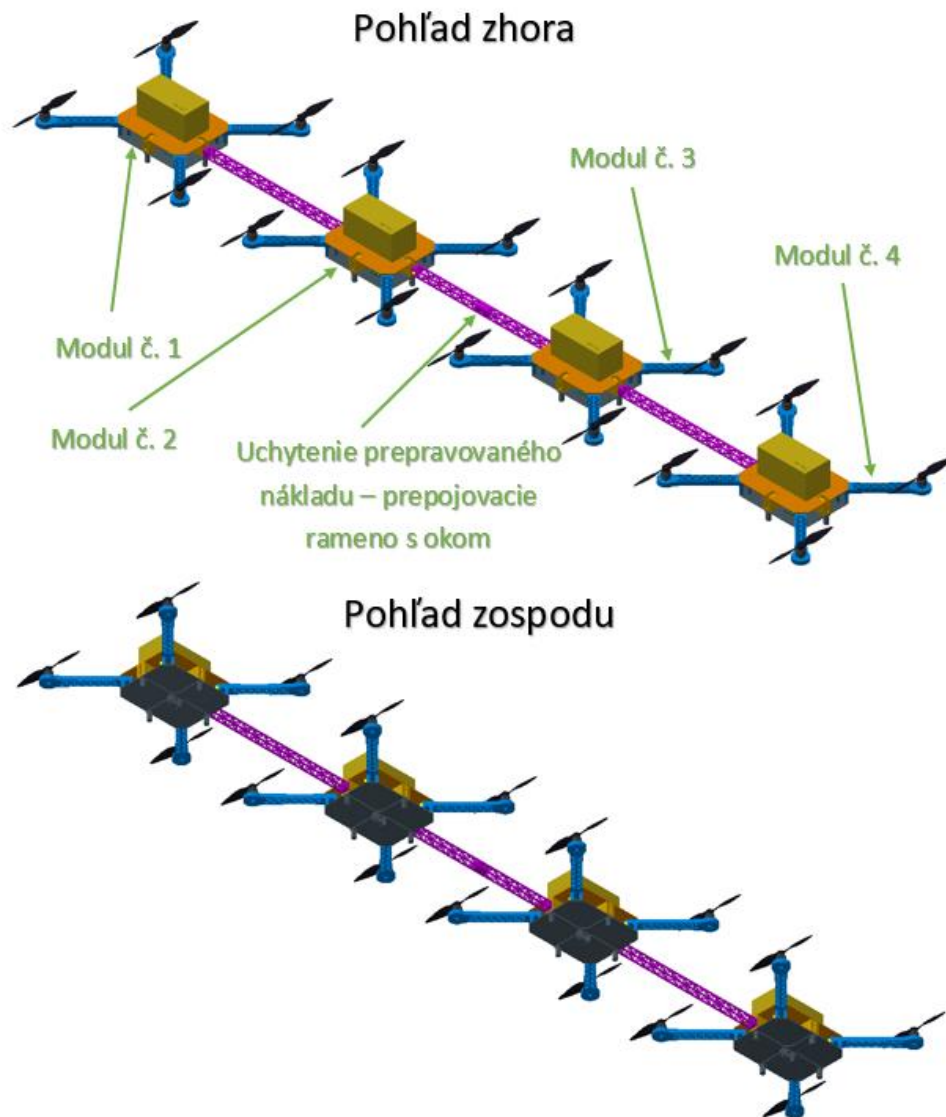


Obr. 17 3D model UAV s 3 modulmi

Prepravovaný náklad je ,ako to bolo aj v UAV s 1 modulom, bezpečne uchytený pomocou uchyťavacieho oka. Oko, ktoré sa bude používať na tento náklad, sa nachádza v module č.2. Je to kvôli tomu, že v tomto module sa nachádza ťažisko celého UAV. Vďaka tomuto riešeniu dron zostane stabilný počas letu, čím sa minimalizuje riziko nevyváženosti.

5.3.4 Optimálna konštrukcia UAV – 4 moduly

Konfigurácia dronu so 4 modulmi je optimálna pre 2,5% zadaní. Je to konkrétne pri dobe letu 21 minút a prepravovanom náklade 5 až 10 kg. Na Obr. 1818 je možné vidieť 3D model so 4 modulmi.

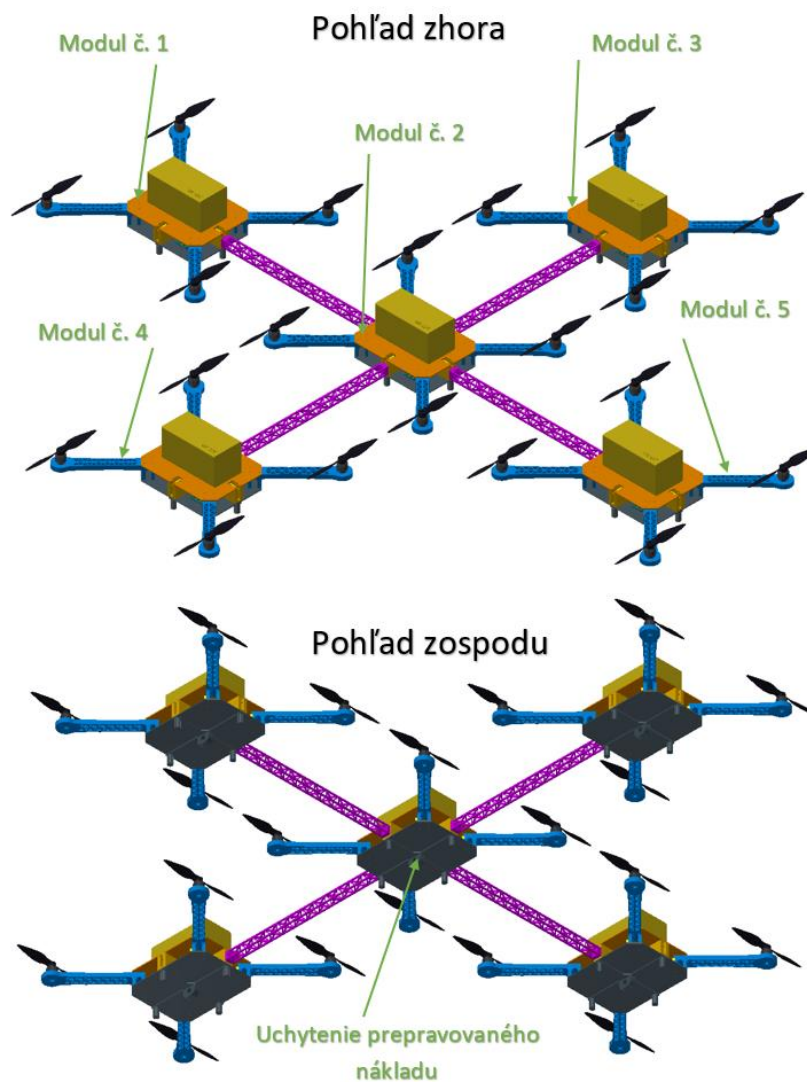


Obr. 18 3D model UAV so 4 modulmi

Pri tejto konfigurácii je spôsob uchytenia prepravovaného nákladu vyriešený podobne ako je to pri UAV s 2 modulmi. Náklad sa uchyťava do prepojovacieho ramena s okom. Na rozdiel od 2 modulovej konfigurácie, sa tu okrem tohto ramena nachádzajú aj prepojovacie ramená (bez oka).

5.3.5 Optimálna konštrukcia UAV – 5 modulov

Pre náklad o hmotnosti 5 až 10 kg bol vyhodnotený na základe optimalizácie dron s 5 modulmi, avšak iba pre čas prepravy 23 minút. Aj napriek tomu, že toto riešenie pokryje len 2,5% zadaní, je o to dôležitejšie, že vďaka nemu je UAV schopné prepravovať aj prepravovaný náklad väčších hmotností.

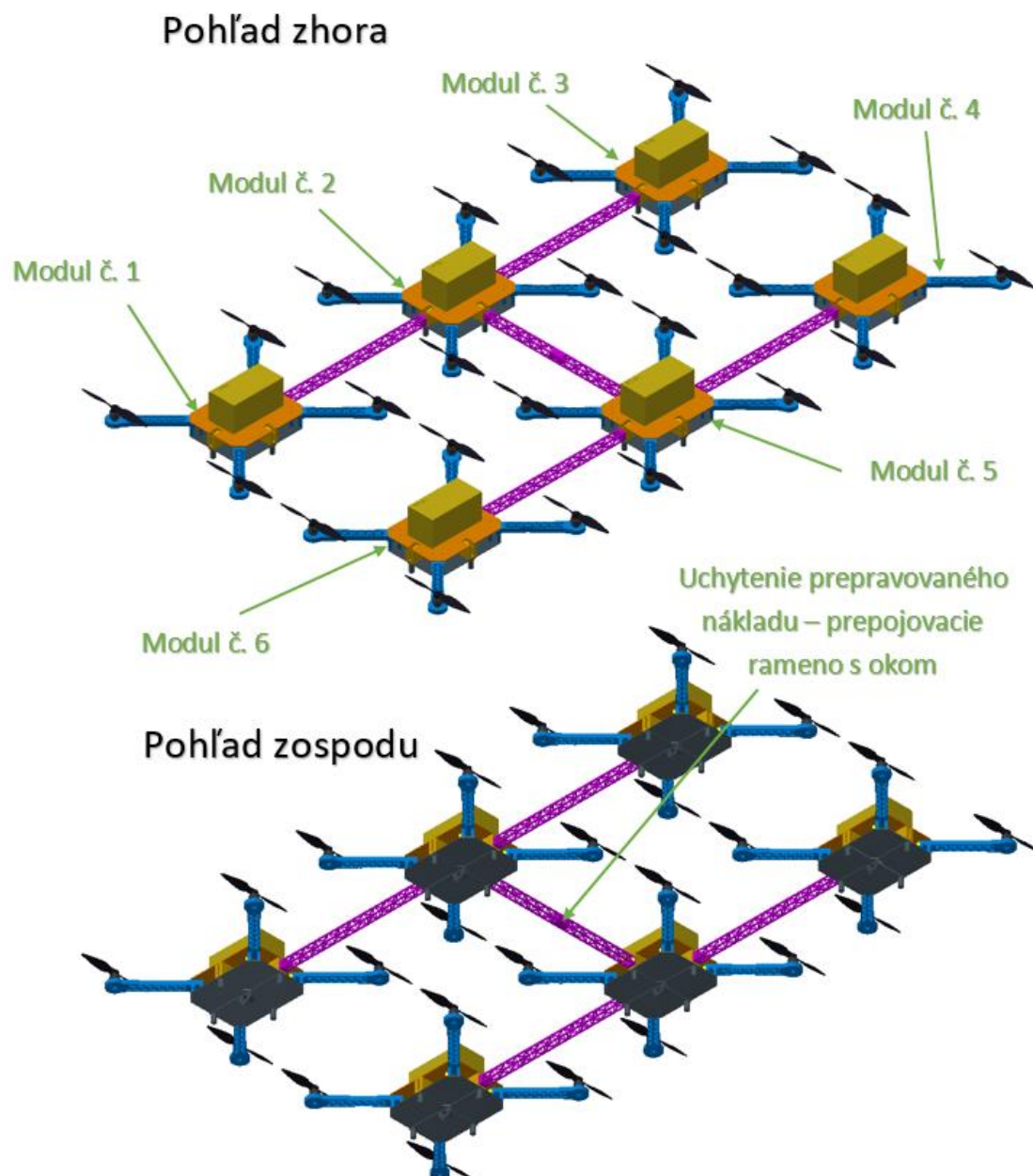


Obr. 19 3D model UAV s 5 modulmi

Pre prepravu nákladu sa bude používať oko modulu č.2. Dôvod je ten že práve v tomto module sa nachádza ťažisko celého UAV.

5.3.6 Optimálna konštrukcia UAV – 6 modulov

Pri najťažších hmotnostiach a najdlhších prepravovaných časoch je ako optimálne riešenie vyhodnotené 6 modulové UAV, Obr. 20. Toto riešenie je použité len pri 2,5 % prípadoch, avšak bez neho by nebola pokrytá najväčšia prepravovaná hmotnosť, 5 až 10kg, na najväčšiu dobu letu 25 min.



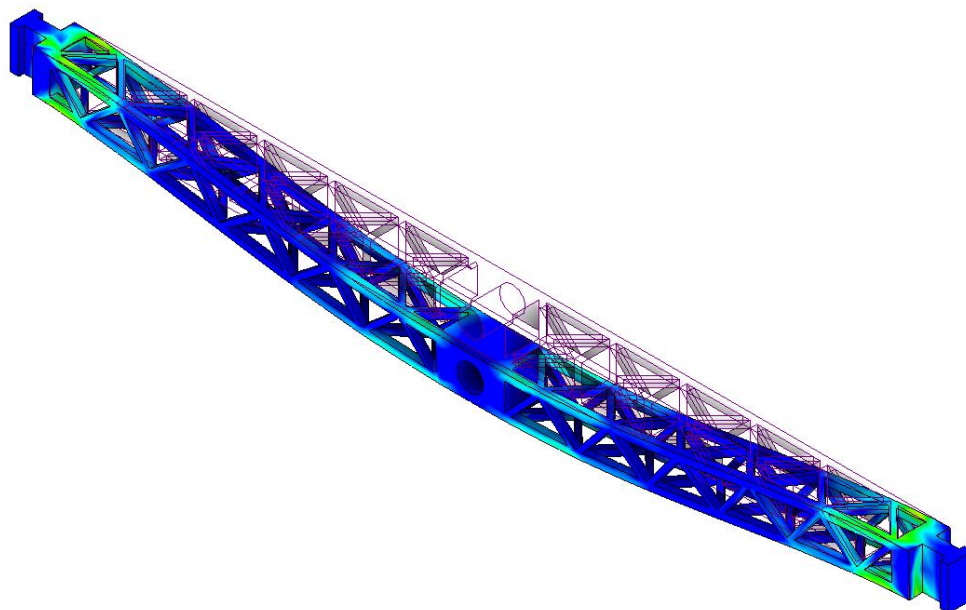
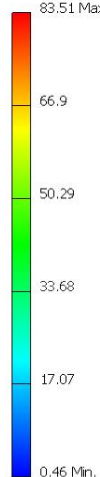
Obr. 20 3D model UAV so 6 modulmi

V tomto prípade sú použité 4 prepojovacie ramená, konkrétne medzi modulmi 1 a 2, 2 a 3, 4 a 5, 5 a 6. Medzi modulmi 2 a 3 je použité prepojovacie rameno s okom, na ktorom bude uchytený prepravovaný náklad.

Nakoľko je pri koncepcii so 6 modulmi sila pôsobiaca na prepojovacie rameno s okom vyššia ako pri ostatných konfiguráciách, pre overenie je nutné spraviť opätovnú MKP analýzu. Do tejto analýzy je nutné zahrnúť to, že celková sila, ktorá pôsobí na rameno je vyššia. Dôvod je, že celkový ťah motora bude prenesený na prepojovacie rameno s okom. V prípade, že rameno daným testom nevyhoví, je možné pridať ďalšie 2 ramená. Prvé rameno medzi modulom č.1 a modulom č.6. Druhé rameno medzi modulom č. 3 a modulom č. 4. Toto riešenie by však spôsobilo to, že sa zdvihne aj celková váha UAV.

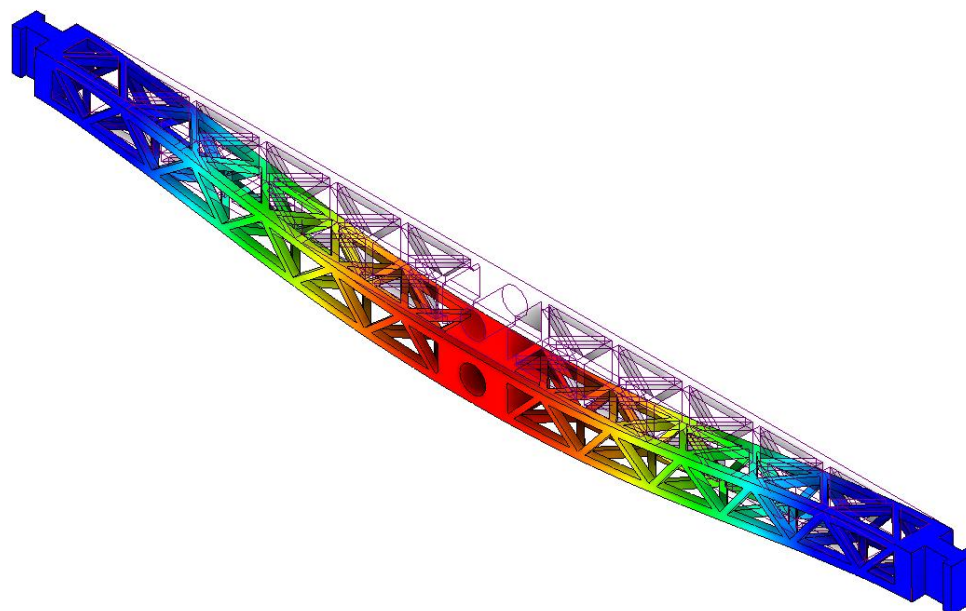
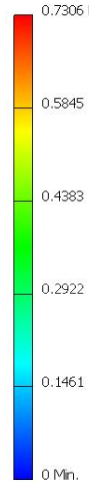
V nasledujúcej MKP analýze, Obr. 21 a Obr. 22, je možné vidieť rameno s okom pri zaťažení 1200N.

Jednotka: MPa
19.6.2024, 18:34:48
83.51 Max.



Obr. 21 MKP analýza napätia prepojovacieho ramena s okom - 6 modulov

Jednotka: mm
19.6.2024, 18:42:41
0.7306 Max.



Y

Obr. 22 MKP analýza posunutia prepojovacieho ramena s okom – 6 modulov

MKP analýza identifikovala maximálne napätie 83,51 MPa, v mieste upevnenia prepravovaného nákladu. Keďže medza klzu materiálu je 110 MPa, je možné konštatovať, že je dané rameno pre tento účel dostačujúce. Z toho vyplýva, že nie je nutné pridávať ďalšie 2 ramená.

6. ZÁVER

V prvej časti tejto dizertačnej práce je spracovaný úvod do problematiky bezpilotných leteckých prostriedkov (UAV), vrátane ich rozdelenia a typov. Súčasťou práce je aj popis základných komponentov, z ktorých sa každý UAV skladá. Následne boli zozbierané dostupné štatistické údaje o hmotnostiach prepravovaného nákladu v rôznych spoločnostiach.

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť proces optimalizácie, na základe ktorého je možné vytvoriť modulárny systém UAV pre prepravu v konkrétnej inštitúcii alebo firme. Tento proces optimalizácie je založený na detailných vstupných údajoch, týkajúcich sa prepravovaných materiálov a ich hmotností. Práca obsahuje implementáciu tohto procesu pre konkrétne riešenie, čo poskytuje praktický návod pre jeho aplikáciu.

Prínosom tejto práce je detailná analýza a popis optimalizačného procesu, ktorý umožňuje implementáciu modulárnych UAV systémov v praxi. Na základe získaných vedeckých poznatkov je v práci vytvorený 3D model modulárneho UAV. Tento model pozostáva z jednotlivých modulov, ktoré je možné kombinovať, aby sa zabezpečila ich optimálnosť a flexibilita v rôznych priemyselných aplikáciách.

6.1 Prínosy pre vedu

Táto dizertačná práca prináša významný prínos pre vedu, najmä v oblasti vývoja a optimalizácie UAV. Práca predstavuje inovatívny prístup k návrhu modulárnych UAV, ktorý umožňuje ich prispôsobenie rôznym priemyselným aplikáciám. Významným prínosom je vyvinutie metodológie optimalizácie, ktorá umožňuje presné dimenzovanie UAV na základe vstupných údajov o hmotnosti prepravovaných materiálov. Tento postup poskytuje univerzálny nástroj pre návrh efektívnych a prispôsobiteľných UAV. Výsledný 3D model môže slúžiť ako základ pre budúce výskumy a vývoj nových modulárnych systémov. Modulárny prístup k návrhu UAV zvyšuje flexibilitu a prispôsobiteľnosť týchto prostriedkov pre rôzne úlohy a podmienky, čo podporuje interdisciplinárny výskum a inovácie. Celkový prínos tejto práce pre vedu spočíva v jej inovatívnom prístupe a praktických aplikáciách, ktoré môžu významne ovplyvniť budúci vývoj v oblasti autonómnych lietajúcich prostriedkov. Práca poskytuje pevný základ pre ďalší výskum a vývoj, ktorý môže viesť k novým technologickým pokrokom a aplikáciám v rôznych priemyselných odvetviach.

6.2 Prínosy pre prax

Práca prináša významné prínosy pre prax, najmä v oblasti priemyselnej prepravy a logistiky. Vytvorenie modulárnej konštrukcie autonómnych lietajúcich prostriedkov (UAV) umožňuje prispôsobenie dronov konkrétnym potrebám priemyselných aplikácií, čím zvyšuje ich efektivitu a flexibilitu. Modulárne UAV môžu byť jednoducho upravované pridaním alebo odstránením modulov, čo umožňuje rýchle prispôsobenie sa rôznym úlohám a meniacim sa požiadavkám v rámci priemyselného prostredia. Tento

prístup umožňuje firmám optimalizovať svoje prepravné procesy, znižovať náklady na údržbu a zvyšovať produktivitu. Praktickým prínosom je aj zníženie ekologického dopadu priemyselnej prepravy, keďže modulárne UAV sú navrhnuté tak, aby minimalizovali spotrebu energie a produkciu odpadu.

Práca obsahuje podrobnú metodiku optimalizácie, ktorá môže byť implementovaná v reálnych priemyselných aplikáciách. Tento optimalizačný proces umožňuje firmám navrhnuť a vyvinúť UAV, ktoré presne vyhovujú ich potrebám.

Modulárne UAV môžu byť po ďalších úpravách použité v rôznych priemyselných aplikáciách, vrátane prepravy súčiastok a materiálov na montážne linky, dopravy nástrojov a zásob potrebných pre údržbu alebo opravy strojov, inventarizácie a kontroly zásob, a vizuálnej kontroly stavu zariadení a infraštruktúry.

6.3 Prínosy pre vzdelávanie

Dizertačná práca prináša významné prínosy aj pre oblasť vzdelávania, najmä v technických a inžinierskych odboroch. Práca ponúka podrobný a systematický prístup k návrhu a optimalizácii modulárnych UAV, čo môže slúžiť ako cenný vzdelávací nástroj pre študentov a výskumníkov. Študenti môžu využiť túto prácu ako modelový príklad pri štúdiu metodológie optimalizácie a návrhu UAV. Podrobný popis procesov, analýz a výsledkov poskytuje praktický návod na implementáciu teoretických poznatkov do reálnych aplikácií, čo môže výrazne prispieť k lepšiemu pochopeniu a zvládnutiu zložitých technických konceptov.

Vytvorený 3D model modulárneho UAV je ďalším dôležitým prínosom pre vzdelávanie. Tento model umožňuje študentom a výskumníkom vizualizovať a experimentovať s rôznymi konfiguráciami UAV, čím získavajú praktické skúsenosti s návrhom a optimalizáciou technických systémov. Použitie 3D modelov v edukačnom procese podporuje interaktivitu a zapojenie študentov, čo vedie k hlbšiemu porozumeniu problematiky.

7. RESUME

The first part of this dissertation provides an introduction to unmanned aerial vehicles (UAVs), including their classification and types. The thesis also includes a description of the basic components that make up each UAV. Subsequently, available statistical data on the weights of cargo carried by different companies have been collected.

This thesis aimed to propose an optimization process that can be used to create a modular UAV system for transportation in a specific institution or company. This optimization process is based on detailed input data related to the materials transported and their weights. The thesis includes an implementation of this process for a specific solution, providing practical guidance for its application.

The contribution of this thesis is the detailed analysis and description of the optimization process, which enables the implementation of modular UAV systems in practice. Based on the scientific knowledge gained, a 3D model of a modular UAV is created in the thesis. This model consists of individual modules that can be combined to ensure their optimality and flexibility in different industrial applications.

8. BIBLIOGRAFIA

Handbook of unmanned aerial vehicles. **Valavanis, Kimon P., and George J. Vachtsevanos,** s.l. : Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.

Keane, John F., and Stephen S. Carr. A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins APL Technical Digest.* 2013, 558-571.

Konrád, Lubomír. <http://stary.mladyvedec.sk/>. [Online] 2019. [Dátum: 15. 8 2022.]

First Flight, 120 Feet in 12 Seconds. **W. Wright, O. Wright , J. Daniels.** Kitty Hawk : In Library of Congress, 1903.

<https://www.nationalmuseum.af.mil/>. [Online] 2022. [Dátum: 25. 1 2023.]

J. Karas, T. Tichý. *Drony.* Brno : Computer press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.

<https://www.aerotelemetry.com/kettering-bug>. [Online] 2021. [Dátum: 1. 12 2022.]

<https://www.suasnews.com>. [Online] 2015. [Dátum: 15. 1 2023.]

Murajdová, A. <https://www.startitup.sk/slovenski-vodici-pozor-policahti-si-na-teba-posvietia-profesionalnymi-dronmi-nemas-sancu-vsimgnut-si-ich/>. [Online] 2022. [Dátum: 15. 8 2022.]

<https://www.minv.sk/>. [Online] 2022. [Dátum: 18. 9 2022.]

Bezpilotné systémy vo fyzickej geografii. **Sládek, J.** Bratislava : s.n., 2017. ISSN 2533-7556.

<https://techfun.sk/>. [Online] 2020. [Dátum: 5. 11 2022.]

<https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk/>. [Online] 2022. [Dátum: 02. 08 2022.]

<https://portal.rozhlas.cz/>. [Online] 2016. [Dátum: 19. 11 2022.]

Abdad, Muhammad Yasir, Sugito Sugito. Drone Bayraktar TB2 sebagai Instrumen Diplomasi Pertahanan Internasional Turki. *Global Political Studies Journal*. 6.2, 2022.

<https://www.aljazeera.com/news/2022/3/11/turkey-drones-use-ukraine>. [Online] 2022. [Dátum: 30. 10 2022.]

A Review of DJI's Mavic Pro Precision Landing Accuracy. **C. Yoakum, J. Cerreta.** s.l. : International Journal of Aviation, Aeronautics, 2020.

S. Anweiler, D. Piwowarski. Multicopter platform prototype for environmental monitoring. *Journal of Cleaner Production*. 155, 2017, 204-211.

Midth, A. Drone Motor Fundamentals – How Brushless Motor Works. [Online] 2015. [Dátum: 06. 02 2022.] https://dronenodes.com/drone-motors-brushless-guide/?fbclid=IwAR2MGXvROCuqxZ4y4YXGCM8aLOMLdsc5Tf3X_zjbYfSn3-u3bbbhTu_j1MI.

<https://robu.in/brushless-dc-motor-working-principle-construction-applications/>. [Online] 2020. [Dátum: 8. 5 2022.]

M. Zulkifli, E. Sulaiman. The Optimization of 12S-14P Brushless DC Motor for Drone Application: Optimization 12S-14P BLDC Motor for Drone Application. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2021, 96-105.

Reid, J. Understanding Kv Ratings. [Online] 2017. [Dátum: 07. 02 2022.] <https://www.rotordronepro.com/understanding-kv-ratings/>.

Frost, J. How A Propeller Generates Thrust. [Online] 2021. [Dátum: 09. 02 2022.] <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/how-a-propeller-works-and-generates-thrust-as-it-spins/>.

<https://www.conrad.sk/>. [Online] 2021. [Dátum: 22. 7 2022.]

Sagoff, J. Charging of the batteries. [Online] 2021. [Dátum: 20. 03 2022.] <https://techxplore.com/news/2021-12-scientists-batteries-minutes.html>.

History of lithium batteries. **Scrosati, B.** s.l. : Journal of solid state electrochemistry, 2011. 1623-1630.

Recycling of lithium-ion batteries. **Huang, B.** s.l. : Journal of Power sources, 2018, Zv. 399. 274-286.

F. Hillier, G. Lieberman. *Introduction to operations research.* s.l. : McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-0073376295.

W. Forst, D. Hoffmann. *Optimization—theory and practice.* New York : Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 978-0-387-78977-4.

<https://podkapotou.zoznam.sk/>. [Online] 27. 06 2023. [Dátum: 15. 02 2024.]

<https://podkapotou.zoznam.sk/cl/1000610/2548085/Slovensky-InoBat-sokuje--Nova-EV-bateria-prekonava-najlepsich-konkurentov>.

R. Baštovanský, J. Bronček, M. Žarnay. *Metodika konštruovania*. Žilina : EDIS - vydavateľské centrum ŽU, 2017. ISBN 978-80-554-1369-3.

https://s.alicdn.com/@sc04/kf/H7deab81ede464a8ab5e0b47d66a723d4y.jpg_300x300.jpg. [Online] 2022. [Dátum: 10. 6 2024.]

Experimental Modal Analysis Assessment of a Scaled-Down Tower Crane Mast to be Used in Experimental Studies. **Hamit Kenan, C. Oktay Azeloğlu**. 1867-1876, s.l. : Iranian Journal of Science and Technology , Transactions of Mechanical Engineering, Zv. 47.4.

<https://www.printables.com/model/323916-custom-voron-v01-light-x-axis>. [Online] 2023. [Dátum: 13. 4 2024.]

Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. **Yedamale**, P. s.l. : Microchip Technology Inc, 2003. 3-15.

9. PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ DOKTORANDA

Publikácia v zahr. vedeckom časopise:

1. **Fiačan, J., Jenis, J., Čechmánek, D., Hrček, S., & Michal, P.** (2023). Structural Design and Safety Verification of a Service Hatch Used at Airports by FEM Analysis. *Infrastructures*, 8(4), 73. Článok indexovaný v Scopuse (Q2) a vo WoSe (Q2). Článok bol publikovaný.
2. **Michal, P., Vaško, M., Sapieta, M., Majko, J., Fiačan, J.** (2024) The Impact of Internal Structure Changes on the Damping Properties of 3D Printed Composite Material, Additive Manufacturing Technologies, Článok bude indexovaný v Scopuse (Q2) a vo WoSe (Q2). akceptovaný, v procese uverejnenia.

Publikácia v dom. vedeckom časopise:

1. **Weis, P., Smetanka, L., Hrček, S., Brumerčík, F., Fiačan, J., & Irfan, M.** (2023). Identification of Flexspline Parameters Affecting the Harmonic Drive Lost Motion Using the Global Sensitivity Analysis. *COMMUNICATIONS*, 25(2), B86-B94. Článok bol publikovaný

Publikácia v zahr. zborníku vedeckej konferencie:

1. **Ondriga, J., Jenis, J., Fiačan, J., Hrček, S., Lukáč, M.**, Preparation of synthetic data to be used as inputs for neural network using CAD system, ICMD 2022, Článok indexovaný vo WoSe.

2. **Šteininger, J., Hrček, S., Gajdáč, I., Spišák, P., Fiačan, J.,** Testing of Axleboxes for Railway Vehicles on the TBRB 01 Test Bench in Accordance with EN 12 082, ICMD 2022, Článok indexovaný vo WoSe.
3. **Fiačan, J., Hrček, S., Brumerčík, F., Ondriga, J., Steininger, J., Michal, P., Šavrnich, Z.,** Mathematical analysis of propeller flight simulation, ICMD 2022, Článok indexovaný vo WoSe.
4. **Dižo, J., Blatnický, M., Fiačan, J., Semenov, S., & Mikhailov, E.** (2021). Engineering Design of a Tyre-rail Adapter for a Light Road-rail Vehicle. In *Transport Means-Proceedings of the International Conference* (pp. 183-187). Článok bol publikovaný
5. **Dižo, J., Blatnický, M., Fiačan, J., Mikhailov E., S. Semenov,** Design of a steel-steel adapter for a light rail-road vehicle, International Scientific Conference Transport Means 2022, Článok bol publikovaný
6. **Dižo, J., Blatnický M., Fiačan, J., Mikhailov E., S. Semenov,** Engineering Design of a Tyre-rail Adapter for a Light Road-rail Vehicle, International Scientific Conference Transport Means 2021 1822296X 2021, Článok bol publikovaný

Publikácia v dom. zborníku vedeckej konferencie:

1. **Fiačan, J., Hrček, S., Jenis, J., & Čuchor, M.** (2023). FEM analysis of the hatch for special use. *Transportation Research Procedia*, 74, 563-567. Článok bude indexovaný v Scopuse. akceptovaný, v procese uverejnenia.
2. **Pompáš, L., Kučera, L., Čechmánek, D., & Fiačan, J.** (2023). Construction design of the reaction arm for tightening tools. *Transportation Research Procedia*, 74, 568-575. Článok bude indexovaný v Scopuse. akceptovaný, v procese uverejnenia.
3. **Čuchor, D., Fiačan, J., Čechmánek, D., & Bronček, J.** (2023). Design of specialized gripper for automated casting manipulation. *Transportation Research Procedia*, 74, 584-591, Článok bude indexovaný v Scopuse. akceptovaný, v procese uverejnenia.
4. **Gažo, M., & Fiačan, J.** (2023). Additive brakes. *Transportation Research Procedia*, 74, 640-647, Článok bude indexovaný v Scopuse. akceptovaný, v procese uverejnenia.
5. **Fiačan, J., Hrček, S., Čechmánek, D., Pompáš, L.,** SEMDOK 2023, Matematická analýza simulácie letu vrtule, Článok akceptovaný
6. **Fiačan, J., Hrček, S., Knap, V., Čuchor, D., Vereš, M.,** 20th INTERNATIONAL TECHNICAL SYSTEMS DEGRADATION CONFERENCE, (2024) STRUCTURAL DESIGN OF A MODULAR MOLD FOR CONCRETE LIDS, akceptovaný, v procese uverejnenia.