

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autonomní létající vozidla a jejich aplikace

Autor: **Jiří Buršík**

Vedoucí práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 15. června 2014

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Romanu Čermákovi, PhD za vstřícný přístup při zpracování bakalářské práce, za cenné rady a vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval všem lidem, kteří mně pomohli při shromažďování údajů a zpracování bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Buršík	Jméno Jiří		
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D.	Jméno Roman		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Autonomní létající vozidla a jejich aplikace			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	59	TEXTOVÁ ČÁST	59	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce stručně ukazuje vývoj autonomních létajících vozidel a nastiňuje jejich směr do budoucnosti. Popisuje a porovnává dnes používané autonomní létající vozidla, jejich využití ve vojenských a civilních aplikacích. Představuje projekty vyvíjené na celém světě a nastiňuje návrh modelu kvadrikopty.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Autonomní létající vozidla, UAV, kvadrikopty, kvadrokopty</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Buršík	Name Jiří	
FIELD OF STUDY	2301R016 “Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D.	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLÓMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Unmanned Aerial Vehicles and their application		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	59	TEXT PART	59	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This work shortly disserts the development of Unmanned Aerial Vehicles and predicts the course of development in the future. The work describes and compares the principles of Unmanned Aerial vehicles used in present and usage of UAV in military and civil application. It shows projects developing in the whole world and predicts a proposal of a quadrocopter.
KEY WORDS	Unmanned aerial vehicle, UAV, Quadcopter, Quadrotor, Quadrocopter

Obsah

1	Rešerše v oblasti autonomních létajících vozidel.....	3
1.1	Co jsou autonomní létající vozidla.....	3
1.2	Historie autonomních letadel.....	4
1.2.1	První mechanismy	4
1.2.2	Nová éra	7
1.3	Současný vývoj	9
1.4	Rozdělení UAV	10
1.4.1	Vojenské využití.....	11
1.4.2	Civilní využití	15
1.5	Budoucnost bezpilotních letadel.....	21
2	Konstrukce kvadrikopty	22
2.1	Open - source projekty bezpilotních kvadrikopty.....	22
2.1.1	Arducopter	22
2.1.2	Openpilot.....	22
2.1.3	Paparazzi.....	23
2.1.4	Pixhawk.....	23
2.1.5	Mikrokopter.....	24
2.1.6	KKmulticopter	24
2.1.7	MultiWii.....	24
2.1.8	Aeroquad	25
2.2	Avionika	26
2.2.1	Základní komponenty	26
	Řídící jednotka	26
	Senzory	27
	Střídavé motory, vrtule	29
	Střídavé regulátory	31
	Lithium-polymerový akumulátor.....	32
	Dálkové ovládání a přijímač.....	33
	PC rozhraní	33
	Konstrukce rámu	34
	Kabeláž	35
	Bezpečnost	35

2.2.2	Doplňkové komponenty	35
	Senzor tlaku vzduchu.....	36
	Kompas	37
	GPS.....	37
	Fotoaparát, nahrávání videa	38
2.3	Mechanika létání	40
	Vznášení.....	40
	Úhel náklonu ϕ	40
	Obecná rovnováha sil	42
	Jednoduchý fyzikální model	43
3	Návrh rámu.....	44
3.1	3D model	44
3.2	Modální analýza	49
3.2.1	Výpočet vlastních frekvencí metodou konečných prvků.....	50
3.2.2	Výpočetní model rámu	50
3.2.3	Vytvoření sítě.....	51
3.2.4	Modální analýza rámu	53
3.2.5	Modální analýza rámu s hlavními komponenty	54
3.2.6	Porovnání výsledků.....	56
4	Závěr	59
5	Použitá literatura.....	60

1 Rešerše v oblasti autonomních létajících vozidel

1.1 Co jsou autonomní létající vozidla

Autonomní létající vozidla jsou bezpilotní letadla, která nyní zažívají rozsáhlý rozvoj. K tomuto rozvoji napomáhá aktuální dostupnost vysokorychlostních počítačů, sofistikovaných matematických nástrojů, lehkých materiálů, bezdrátových komunikačních technologií, účinných zdrojů energie a také dostupnost kamer s vysokým rozlišením. Tyto letadla bývají také označována jako UAV (odvozeno od anglického názvu Unmanned Aerial Vehicle). Bepilotní letadla jsou řízena na dálku nebo mohou létat samostatně pomocí předprogramovaných plánů či pomocí složitějších dynamických systémů. Používají se hlavně v armádě k průzkumným nebo útočným letům. Díky svým malým rozměrům a lehké váze mohou plnit úkoly, které by klasické pilotované stroje splnit nedokázaly. Můžou být použity pro dozor, záchranu, hledání a na mise vědeckého výzkumu v neznámé oblasti, nebezpečném prostředí nebo v prostředí, kde je operace s lidskou posádkou nebezpečná nebo příliš drahá.

Kromě rozsáhlého užívání bezpilotních letadel v armádě jsou aktuálně také využívány civilními uživateli. Mezi civilní uživatele můžeme zařadit i policii, hasiče nebo záchranné služby. Tito uživatelé začínají poznávat možnosti využití těchto levných, bezpečných a uživatelsky přívětivých bezpilotních letadel pro jejich operace. Mezi tyto operace můžeme zahrnout například mapování, kartografie, pohraniční hlídky, zjišťování požárů, monitorování dopravy, ochrana majetku a objektů. Jmenováno bylo jen několik možných využití bezpilotních letadel.

1.2 Historie autonomních letadel

1.2.1 První mechanismy

Doba existence bezpilotních prostředků je podstatně delší, než se většinou soudí. Je doložené, že první významnější příspěvek k autonomním mechanismům se vyskytl během éry Pythagora. První mechanismus je přisuzován Archytasovi, z města Tarentum v jižní Itálii, označovaného jako Leonardo da Vinci starověku. Tento matematik vytvořil první UAV všech dob v podobě mechanického ptáka, který byl pravděpodobně poháněn párou a jeho dolet byl asi 200 metrů. Pták byl postaven ze dřeva a vynálezce ho pojmenoval létající holub.[1]



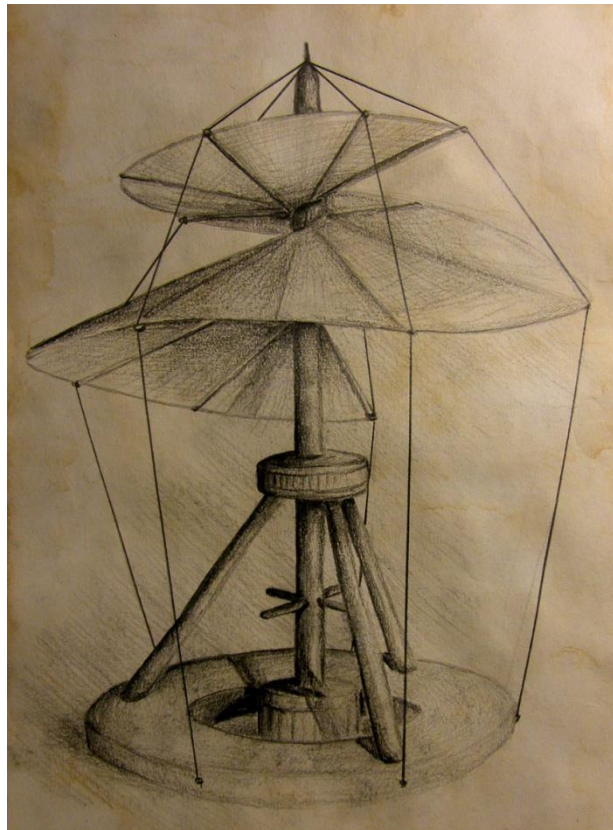
Obrázek 1 - první UAV v podobě létajícího ptáka[1]

Další pokus o vertikální létání je zaznamenán 400 let před naším letopočtem v Číně. Jsou to zmínky o hračkách, inspirovaných létajícími semeny stromů, které k létání užívají vlastní rotace. Jedná se o pírka, která jsou umístěna na konci tyčky. Tyčka byla roztáčena mezi dlaněmi a způsobený tah umožňoval volný let. O osm století později už dokázali Číňané popsat i obecný princip vrtulníku. Žádný známý pramen se ale nezmiňuje o tom, zda se odhodlali i k praktickým zkouškám.

Podobným problémem se později také zabíral muž fascinovaný fenoménem létání, který podrobně nastudoval lety ptáků, aby později mohl vytvořit podrobné plány na sestrojení několika létajících mechanismů. Ten muž se jmenoval Leonardo da Vinci a v roce 1483 představil svou vizi létajícího šroubu.

„Nalézám, že je-li tento přístroj vytvořený v podobě šroubu dobře zhotoven, totiž ze škrabového plátna a rychle otáčen, tu si řečený šroub vytvoří matici a vznese se...”

píše Leonardo da Vinci ve svém spise o možnostech létajícího šroubu. Podle plánů mělo mít letadlo průměr pět metrů a ovládáno mělo být pravděpodobně čtyřmi muži, kteří by stáli na centrální desce. Pomocí svých rukou by otáčeli hřídel s plátnem a tím by vznikl potřebný vztlak. Hlavní myšlenkou bylo, že v případě adekvátní hnací síly by se stroj točil ve vzduchu a vzlétl. Zůstalo však jen u teorie, lidé v té době nebyli schopni vytvořit tolik energie, aby se šroub do vzduchu skutečně vznosl.[2]



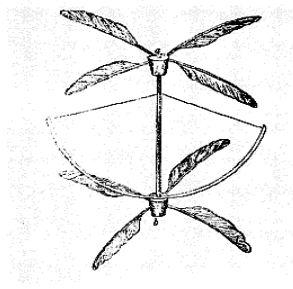
Obrázek 2 - Létající šroub Leonarda da Vinci[2]



Obrázek 3 - Lomonosův model[28]

Další dva návrhy vycházející z nejvyšší čínské idey byly zdokumentovány v roce 1754 a 1783. První z nich navrhl Michail Lomonosov. Vycházel ze vzoru čínských hraček (pírka umístěná na konci tyčky) a zhotovil návrh koaxiálního rotoru poháněného pružinou, který byl schopen vznést se do výšky za pomoci dvou rotujících vrtulek. Rotor byl také součástí modelu vrtulníku na meteorologické zkoumání atmosféry.

Druhý navrhli Launoy a Bienvenue. Tito dva vědci z Francie sestrojili létající model, který měl dva souosé čtyřlísté rotory. Rotory jsou poháněné energií ohnuté ocelové tětiny a ta je upevněná na luku z kostice. Nosné plochy lopatek byly zhotoveny z ptačích per.



Obrázek 4 - helikoptéra Launoy a Bienvenue[3]

Jako další významná osobnost v konstrukci letadel byl sir George Cayley, který proslul zejména jako konstruktér kluzáků a popsal základní principy letadel těžších než vzduch.



Obrázek 5 - Cayleyův projekt[3]

Objevil základní principy mechaniky letu, pro které má těžiště a jeho poloha zásadní význam.

Mezi Cayleyovi významné návrhy patří létající vozidlo. Tento stroj měl na každé straně trupu mírně našikmené vznosné vrtule. Jejich rotací se mělo letadlo vznést svisle vzhůru. Po vznesení letadla se zapojí do chodu malé dvoulísté tlačné vrtule. Listy vznosných vrtulí se pak natočí naplocho, čímž se vytvoří kruhové plochy plošníku a

letadlo pokračuje v letu jako plošník. Cayleyův projekt měl výškové i směrové kormidlo a čtyřkolový podvozek. Byl by schopný jak vzletu a přistání, tak ale i letu dopřednou rychlostí. Cayley neměl bohužel pro svůj stroj vhodný motor. V roce 1842 přichází se zajímavým řešením Angličan Horatio Phillips. Jeho model měl dvě protiběžné vrtule nad sebou. Trubkovými podélníky vrtulí procházely plyny vzniklé spalením směsi, které byly strhávány vodní párou. Konce trubek byly ohnuty. Stroj byl schopen prudce se vznést a letět určitou vzdálenost. Nebyl však ovladatelný, takže po krátkém letu dopadl na zem a došlo k destrukci. Dalším konstruktérem, který se snažil pracovat s plynem, byl Francouz Ponton d'Amecourt. Roku 1862 postavil první model vrtulníku poháněný párou. Model byl kovové konstrukce se dvěma protiběžnými rotory na společné ose. Parní stroj, který byl součástí modelu, měl tak malý výkon, že výkon rotorů a tím vzniklý vztlak nepřekonal hmotnost modelu. Model ani jednou nevzlétl. Více úspěchu měl v roce 1907 Paul Cornu. Cornu postavil vrtulník se dvěma protiběžnými rotory o průměru 6 metrů. Potřebnou sílu pro vzlet zajistil motor o výkonu 24 koní. Při prvním pokusu se tento 330 kilogramů těžký stroj vznést do výšky třiceti centimetrů.

Významnou osobností ve vývoji vrtulníků byl Igor Ivanovič Sikorskij. Pro svůj významný vývoj, je považován za „otce“ vrtulníků. Na jeho úspěšných modelech vrtulníků byly založeny designy dalších strojů. Svůj první prototyp postavil v roce 1909. Nepilotovaný vrtulník kvůli problémům s vibracemi a nedostatečně silným motorem nikdy nelétal. Sikorskij se pak začíná plně věnovat vývoji helikoptér po emigraci do USA. Jeho vrtulníky byly ovladatelné, bezpečně létaly dopředu a dozadu, nahoru a dolů a do stran.[3]



Obrázek 6 - Sikorskiho helikoptéra[3]

1.2.2 Nová éra

Za zlom ve vývoji bezpilotních letadel lze považovat snahu o jejich nasazení ve vojenských aplikacích. Svoji roli zde také sehrála válečná období, kdy každá armáda se snaží být o krok před nepřítelem a do projektů, jako je například vývoj letadel bojových či průzkumných, plynou veliké sumy peněz. První bezpilotní letadlo bylo představené už během První světové války v roce 1917. V té době nebyla technika pro UAV ještě vyspělá a letadla byla nespolehlivá a nepřesná. První bezpilotní letadlo představil profesor Archibald Montgomery Lowa. Svůj stroj nazval vzdušný cíl (Aerial Target). Název vzdušný cíl byl zvolen proto, aby mátl nepřítele, který si měl myslet, že jde o letadla určená k testování protiletadlových zbraní. Ve skutečnosti bylo úkolem profesora Lowa použít svůj civilní výzkum radiových vln a najít způsob, jak ovládat letadla na dálku. Ty po té mohly být použity jako řízené střely. Po úspěchu profesora Lowa následovalo mnoho letadel řízených na dálku. Jedním byl projekt bezpilotního dálkově ovládaného letounu vyvíjeného v USA.

Jeho název je Hewitt – Sperry Automatic Airplane a v roce 1918 měl první úspěšnou ukázkou svého letu. Prototyp letadla byl schopen na vzdálenost 640 kilometrů unést 455 kilogramů písku, který simuloval tisíciliberní nálož. I přes různorodé výsledky v bezpilotních zkušebních letech byl poznán jejich velký vojenský potenciál. Po první světové válce se začaly vyvíjet další bezpilotní letadla, zejména v USA a ve Velké Británii. Úroveň techniky v té době ještě neumožňovala jejich použití pro průzkum, tak se využívaly většinou jako terče pro nácvič protiletadlové střelby nebo dálkově řízené střely. Britské letectvo hojně využívalo upravenou verzi dvouplošníku Tiger Moth. Tiger Moth byl cvičný letoun, zkonstruován Geoffreyem de Havillandem v roce 1931. Upravená verze dvouplošníku, která sloužila jako bezpilotní letadlo, byla nazvána Queen Bee. Americká armáda nakupovala letadla od Radioplane Company. Stroje svou konstrukcí připomínaly dnešní letecké modely a nesly označení RP – 5. Americká armáda si tento model přejmenovala na Radioplane OQ – 2.

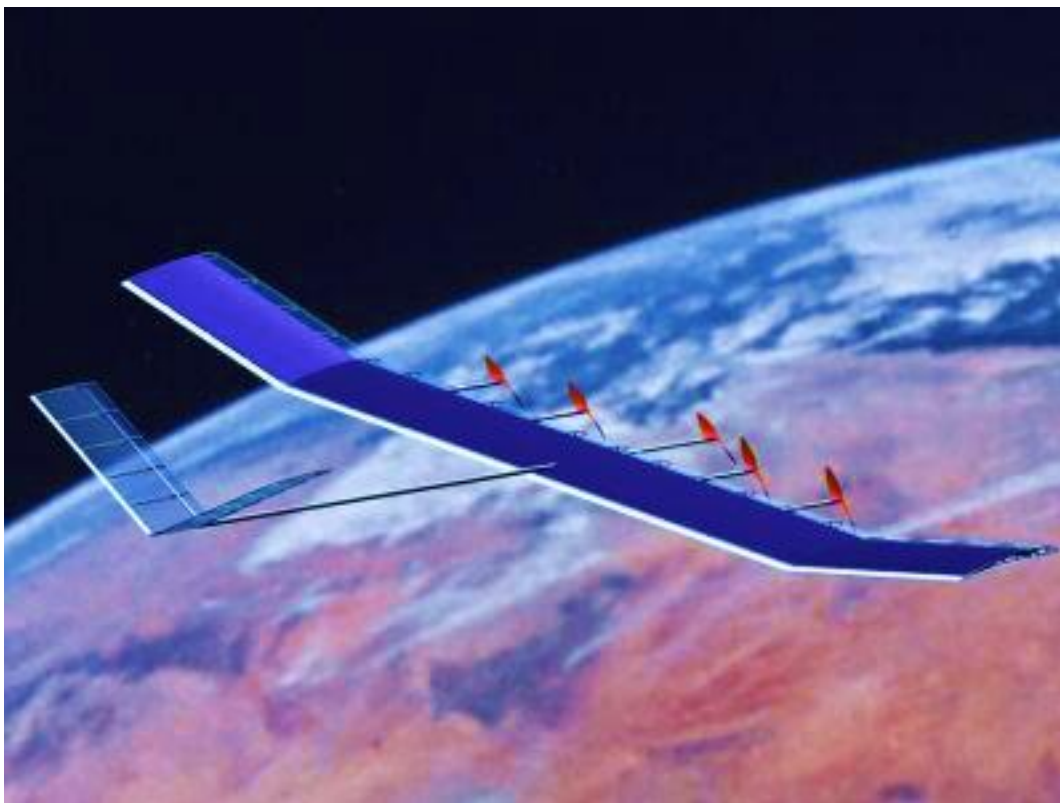
Svého nasazení se bezpilotní letadla dočkala i ve Druhé světové válce. Používaly se nejen jako cvičné cíle, ale také při plnění bojových misí. Bojové použití zahrnoval známý program americké armády – Afrodite. V tomto programu byly používány dálkově řízené bombardéry B-17 a B-24. Jejich úkolem bylo ničit významné cíle v Německu a Evropě. Nacistické Německo nasazovalo stroj Mistel. Mistel byl tajným bombardovacím systémem německé luftwaffe a měl umožnit útoky na velmi odolné cíle, kterými byly například válečné lodě. Po skončení Druhé světové války vývoj UAV zesílil. Okruh bezpilotních systémů se rozšiřuje. V korejské válce se používaly například sebevražedné stíhače F6F Hellcat a útočný letoun AD Skyrider.

Významným zlomem ve vývoji bezpilotních letadel byla válka ve Vietnamu. Americké letectvo v této válce používalo letoun Ryan Q-2 Firebee poháněný proudovým motorem. Od roku 1964 létaly nad Vietnamem a mimořádně se osvědčily. Vzniklo přes dvacet různých variant, které měly odlišné vybavení. Součástí těchto letadel byl denní nebo noční fotoaparát. Celkem bylo zhotoveno přes tisíc strojů. Ve stejné době už také vyvíjel svá bezpilotní letadla také Sovětský svaz. Prvním typem byl Lavočkin La-17, což byl řízený terč, a v 60. letech byl sestrojen nadzvukový Tu-123 Jastreb. K dalšímu rozvoji dochází v 80. a 90. letech, kdy dochází k miniaturizaci potřebných technologií a je možnost využití počítačů. V této době získává vůdčí postavení Izrael. Armáda Izraele přijímá bezpilotní letadla za součást své výbavy a začíná jim věnovat velkou pozornost. Svá letadla pak nasadila při operacích v Libanonu v roce 1982. Byly to průzkumné stroje Mazlat Mastiff a Scout. Tyto stroje se velmi osvědčily při hledání protiletadlových pozic nepřátel. Nadvládu Izraele potvrzuje i to, že Američané s nimi začali spolupracovat. První model, který Američané získali, byl RQ-2 Pioneer, což byla vylepšená verze modelu Scout. Dalším úspěšným typem, který vzešel z americko-izraelské spolupráce, je RQ-5 Hunter. Výhodnost této spolupráce se prokázala roku 1991, kdy USA s velkým úspěchem nasadila bezpilotní letadla proti Iráku. Američané ovšem nespolehají jen na spolupráci s Izraelem a velké společnosti se začínají pouštět do vlastního programu vývoje bezpilotních letadel.

[Zdroj: 4, 25]

1.3 Současný vývoj

21. století je nepochybně ve znamení bezpilotních prostředků. V současné době na světě létá už okolo sta typů UAV a další nové jsou vyvíjeny. V posledních letech se objevují stále nové a dokonalejší, technologicky propracované typy, které nacházejí své využití především ve vojenských oblastech. Novým trendem je ovšem využití bezpilotních letadel v civilním prostředí. Bepilotní letadla mají schopnost rychle a levně sbírat podrobná data. Tyto systémy se ukazují jako výhodné například v případě požárů, při záplavách nebo jiných živelných pohromách. Některé úvahy jednájí také o využití bezpilotních letadel pro dohled nad místy s vysokou kriminalitou či dohled nad oblastmi hranic států. Jednou z nových oblastí pro využití autonomních letadel může také být dálkový průzkum země. To je metoda, která získává informace o objektech a jevech na povrchu planety Země a to bez nutnosti fyzického kontaktu. Jedná se převážně o obrazové snímání z letadel a satelitů. Snaha využít zde UAV je také z hlediska ekonomického, kdy mají oproti satelitům mnohokrát menší náklady. Jedním z letadel, které by se mohlo využívat je QinetiQ Zephyr. Jeho délka letu je až několik měsíců a to v letové hladině 22 kilometrů.



Obrázek 7 - QinetiQ Zephyr[29]

Největšími přednostmi pro nasazení bezpilotních letadel jsou jejich nízká cena, velký dolet a vytrvalost letu. Mezi ty nejdůležitější přednosti patří také eliminace rizika ztráty na životech.[6]

1.4 Rozdělení UAV

Bezpilotní letadla mohou být rozdělena podle nejrůznějších hledisek, hlavní je však rozdělení podle účelu použití na vojenské a civilní. Důležitými kritérii pro rozlišení typů bezpilotních systémů jsou například rychlost, hmotnost, dolet, vytrvalost letu, letová hladina. Dalším ukazatelem může být způsob vzletu, typ motoru nebo výkon. Těchto kritérií pro rozdělení letadel je hodně a jeden typ UAV může být zařazen i v několika kategoriích zároveň. V následující tabulce je rozdělení podle mezinárodní asociace pro bezpilotní letadla.

	Název kategorie	Dolet [km]	Letová hladina [m]	Výdrž [h]	Hmotnost [kg]
μ	Mikro	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150 – 300	< 2	< 30
CR	Close Range	10 – 30	3000	2 – 4	25 – 150
SR	Short Range	30 – 70	3000	3 – 6	50 – 250
MR	Medium Range	70 – 200	5000	6 – 10	150 – 500
MRE	MR Endurance	> 500	8000	10 – 18	500 – 1500
LADP	Low Alt. Deep Penetration	> 250	50 - 9000	0,5 – 1	250 – 2500
LALE	Low Alt. Long Endurance	> 500	3000	> 24	15 – 25
MALE	Medium Alt. Long Endurance	500 – 750	5000 – 8000	24 – 48	1500
HALE	High Alt. Long Endurance	> 250	20 000	24 – 48	2500 – 5000
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle	400	< 20 000	2	10 000

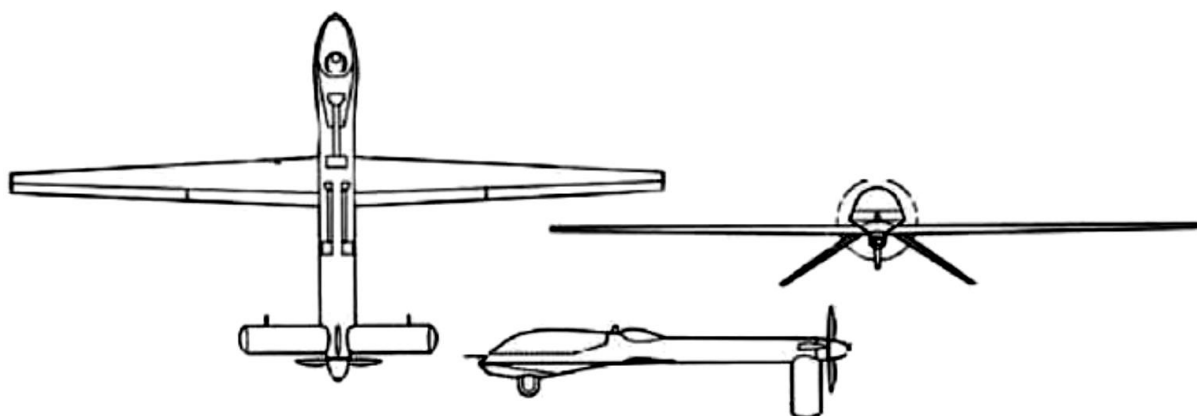
Tabulka 1- Rozdělení UAV[5]

[Zdroj 5]

1.4.1 Vojenské využití

Dnes je bezpilotní letadlo běžný prostředek, který nachází uplatnění v každé armádě. Primární je využití pro průzkumné účely, kdy se získávají neznámá data a informace o nepřátelích, monitorují průběh bojů, zjišťují pohyblivé cíle nebo objekty. Některé typy mohou být osazeny zbraněmi. Tyto útočné varianty likvidují nepřátelské prostředky nebo pozemní cíle.

Mezi nejvýznamnější a nejznámější UAV patří predator, který se stal známým po začátku globální války proti terorismu. Nejedná se pouze o jeden typ, ale o více letadel od společnosti General Atomics. Současný, predator B, vychází z jeho předchůdce predatoru A, který jako první bezpilotní prostředek v historii vypustil řízenou střelu. Americké letectvo ho pak z původního označení RQ-1 Predator přejmenovalo na MQ-1 Predator, aby zdůraznilo, že už se nejedná jen o průzkumný prostředek.



Obrázek 8 - MQ-1 Predator[31]

Navazující model, MQ-9 Reaper, nebo také Predator B je poháněn turbovrtulovým motorem, který mu zajišťuje rychlost přesahující 400 km/h. Byl navržen jako víceúčelový bezpilotní prostředek s dlouhou vytrvalostí letu ve velké výšce. K náplni jeho úkolů patří



Obrázek 9 – MQ-9 Reaper[30]

například průzkum, vyhledávání a zaměrování poloh pozemních cílů, navedení střel. Vnější zatížení, včetně zbraní, může být až do hmotnosti 1361 kg. Predatory jsou vybaveny radary se syntetickou aperturou, přístroji pro let za snížené viditelnosti FLIR a optoelektronickým a infračerveným systémem pro sledování. Může nést různé typy raket a bomb, včetně raket naváděných laserem. [9]

V současné době se vyvíjí systém Predator C Avenger, který má proudový motor Pratt & Whitney PW 545B. Tento letoun je postaven s využitím pokročilých technologií stealth a projekt byl dlouhou dobu utajován. Motor je ochlazován pro snížení infračervené stopy a umožňuje letounu rychlost až 740 km/h. Avenger představuje nejmodernější model UAV kategorie MALE a je upraven i pro použití na letadlových lodích. Hlavním vybavením by měl být zejména přehledový radar, umístěný v krytu pod trupem. Avenger má létat hlavně nad oceány a působit v operační výšce 18 kilometrů.



Obrázek 10 – Predator C Avenger[32]

Vrchol mezi bezpilotními průzkumnými letouny tvoří RQ-4B Global Hawk, který vyrábí americká společnost Northrop Grumman. Jedná se o prostředek kategorie Hale, pro který je typický vysoký dostup a velká vytrvalost. Global Hawk operuje běžně ve výškách nad 19km a dokáže v této výšce setrvat přes 32 hodin. Letoun je poháněn proudovým motorem Rolls – Royce AE – 3007 uloženým na horní části trupu před ocasními plochami. Global Hawk byl vyvinut hlavně pro to, aby nahradil taktické průzkumné letouny U-2.



Obrázek 11 – Global Hawk v řezu[36]

Křídlo Global Hawku je velice štíhlé a má plochu 50m². Je vyrobeno z kompozitních materiálů a jsou v něm umístěny palivové nádrže o kapacitě 4 200kg paliva. Trup je vyroben z hliníkových slitin. Veškeré elektrooptické vybavení je umístěno v přídi. Ve spodní části před přední podvozkovou šachtou se nachází kryt se stabilizovaným elektrooptickým a infračerveným průzkumným vybavením. Nad ním, ve velkém krytu tvořícím hrb, je umístěn satelitní komunikační systém o průměru 1,2 metru. Za tímto vybavením se za přední podvozkovou šachtou nachází radiolokátor. Ve střední části

trupu se nachází rozměrná palivová nádrž až pro 1 800kg paliva. V zadní části trupu je umístěn zásobník se třemi klavnými cíli AN/ALE – 50, které se vypouští otvorem v zádi. Global Hawk má poskytnout rozšířené průzkumné schopnosti nepřátelských sil ve dne nebo v noci bez ohledu na počasí. Proto je vybaven nejmodernějšími technologiemi, mezi kterými nechybí výkonné elektrooptické a infračervené senzory, které využívají společný 10" zrcadlový dalekohled. Během 24 hodin je tedy schopen pokrýt plochu až 103 600 čtverečních kilometrů. Na křídla je možno připevnit až 1 000 liber nákladu na každé.

Global Hawk je poměrně drahý, ale svými funkcemi dokáže plně nahradit průzkumné družice. Jako nahrazení družic se ho snaží využít NASA, která nyní vlastní trojici těchto letadel. Letadla jsou využívána například v projektu GloPac 2010, který je výsledkem spolupráce NASA a americké National Oceanic a Atmospheric Administration. Cílem projektu jsou atmosférická měření nad Tichým a Severním ledovým oceánem. Pro tento úkol je Global Hawk vybaven těmito přístroji:

- Kompaktním atmosférickým „mapovačem“ pro měření rozptylu a absorpce slunečního záření v atmosféře
- Radarem pro vysílání pulzů a snímačem jejich odrazu pro výzkum hustoty oblačnosti a aerosolů
- Dvěma speciálními spektrometry
- Kamerovým systémem s vysokým rozlišením
- Meteorologickou stanicí pro měření tlaku, teploty, vzdušných vírů, směru a rychlosti větru v okolí letadla
- Radiometrem pro měření mikrovlnného vyzařování molekul atmosférického kyslíku
- Citlivým měřičem koncentrace a velikosti aerosolových částic
- Dvojicí chromatogramů pro rozlišení různých molekul ve vzduchu
- Přístrojem pro odběr vzorků vzduchu
- Laserovým vlhkoměrem

Celkový návrh tohoto letadla se tedy jeví jako velmi úspěšný. Důkazem je i to, že Global Hawk jako první UAV získal certifikaci pro užívání vzdušných koridorů od úřadu pro letectví.



Obrázek 12 – RQ – 4B Global Hawk[33]



Obrázek 13 – Global Hawk Pacific[13]

Mezi letadla schopná svislého startu a přistání se řadí MQ-8B Fire Scout. Tento typ vzletu a přistání je pro současné UAV netradiční a Fire Scout tvoří nejvýznamnější výjimku v této oblasti. Byl zkonstruován americkou společností Northrop Grumman pro americké vojenské námořnictvo. Jedná se o bezpilotní helikoptéru, která vychází z civilního vrtulníku Schweizer S 333. Stroj je poháněn spolehlivým turbohřídelovým motorem Rolls – Royce 250-C20, který je schopen stroji umožnit létat až 231km/h. Pod přední trupu je umístěna otočná věžička, která nese průzkumnou výbavu. Součástí výbavy je elektrooptická a infračervená kamera, laserový dálkoměr a značkovač. Helikoptéru lze vybavit laserem naváděnými střelami. Obvyklou úlohou je dohled a průzkum v určené oblasti. Fire Scout je schopen plnit i speciální úkoly, například detekce min v oblasti nebo zásobování jednotek v poli. Pro takové mise je vybaven dvěma pogumovanými kontejnery, které může zanechat na určeném místě. Fire Scout vydrží ve vzduchu téměř 8 hodin a unese více než 250kg nákladu do vzdálenosti až 200 kilometrů od místa startu.

Podobným strojem je čínský bezpilotní vrtulník V750, který vyrábí společnost Tianxiang Aerospace Industry a svými parametry by měl konkurovat právě MQ-8B Fire Scout. Zvládne ale letět jen v poloviční výšce. Jeho maximální rychlost má být 161 km/h, ve vzduchu vydrží přibližně jen 4 hodiny s doletem kolem 150 kilometrů. Je schopen působit ve vzdálenosti až 150 kilometrů od místa řízení, váží 757kg s maximální nosností 80kg. V750 má být používán hlavně pro sledování, vyhledávání a záchranu osob, a na vědecké zkoumání pro vojenské i civilní účely.



Obrázek 14 - Fire Scout [34]



Obrázek 15 – V750[14]

[Zdroj: 10, 11, 12, 13, 14]

Typ	Predator RQ-1A	MQ-9 Reaper	RQ-4B Global Hawk	MQ-8B Fire Scout
Výrobce	General Atomics	General Atomics	Northrop Grumman	Northrop Grumman
Rozpětí[m]	14,84	20,12	39,9	8,38
Délka[m]	8,23	10,97	14,5	6,98
Výška[m]	2,1	3,8	4,63	2,87
Prázdná hmotnost [kg]	512	2223	4 173,05	661
Vzletová hmotnost [kg]	1 020	4 760	14 628,35	1 430
Cestovní rychlost [km/h]	130	276	574,12	231
Dostup[km]	7,62	15	19,812	6,1
Dosah[km]	741	5 926	16 112,4	200
Vytrvalost[h]	40	14	33	8

Tabulka 2 – Technická data vybraných UAV[11]

1.4.2 Civilní využití

Jak již bylo zmíněno, lze bezpilotní prostředky využít nejen v oblasti vojenské, ale také civilní. Vývoj bezpilotních prostředků pro civilní využití patří dnes k moderním trendům ve světě. Po úspěchu těchto prostředků ve vojenských aplikacích se nyní otevírá prostor pro využití bezpilotních prostředků v civilních aplikacích. V České republice provoz těchto strojů podléhá legislativě ČR, a to zákonu o civilním letectví č. 49/1997 sb. §52 **Létání letadel bez pilota.**

„Letadlo způsobilé létat bez pilota může létat nad územím České republiky jen na základě povolení vydaného Úřadem pro civilní letectví se sídlem v Praze a za podmínek v tomto povolení stanovených. Úřad povolení vydá, nebudou-li ohroženy bezpečnost létání ve vzdušném prostoru, stavby a osoby na zemi a životní prostředí.“

Požadavky na letadla v civilním sektoru jsou:

a) Sběr informací

- Zjišťování, pozorování, záznam nebo přenos informací
 - v optickém spektru
 - v infračerveném spektru
 - v rádiových komunikačních pásmech
- Detekce radiace s přenosem dat
- Detekce/analýza chemických látek s přenosem dat

- b) Dlouhodobá retranslace v rádiových sítích
- c) Simulace provozu umělé družice (navigace)
- d) Autonomní i neautonomní vlastní navigaci
- e) Otevřené i utajené on-line přenosy informací

	Vědecké mise	
výzkum atmosféry	oceánografická pozorování	geologický průzkum
studium sopečné aktivity	výzkum hurikánů	předpovídání počasí
	Mise v ohrožení	
řízení a hodnocení krizových situací	pátrací a záchranné akce	boj s požáry
olejové skvrny	pozorování hurikánů	pozorování záplav
monitorování sopek	monitorování zemětřesení	monitorování radiace
	Pozorovací mise	
střežení hranic	detekce lesních požárů	monitorování dopravy
monitorování pobřeží	monitorování vedení VN	monitorování energovodů
monitorování prostředí	námořní hlídkování	narušení zákonů
sledování drogových cest	přesné mapování terénu	sledování úrody a sklizně
	Komunikační mise	
širokopásmová komunikace	přenosové telekomunikační služby	GPS/Galileo systém - pseudosatelity

Tabulka 3 – CUAU aplikace dle CAPECON

[Zdroj 15]



Obrázek 16 – Rmax II[16]

Mezi nejvyspělejší nevojenské UAV patří bezpilotní vrtulník Rmax vyvinutý japonskou firmou Yamaha. Na žádost japonského ministerstva zemědělství, lesnictví a rybolovu začala Yamaha v roce 1983 s vývojem bezpilotního vrtulníku pro aplikaci postřiků na rostliny. První vrtulník byl dokončen už v roce 1987 a nesl označení R – 50. Byl prvním bezpilotním vrtulníkem pro postřik polí schopný nést 20kg zatížení. Poháněn byl kapalinou chlazeným dvoutaktním motorem o objemu 98cc a výkonu 12HP. Vrtulník umožnil přístup k obtížně dostupným polím, která často bývala v kopcích, a mohla tak být ošetřena pesticidy. UAV R – 50 zde nahradil obtížnou ruční práci v extrémních podmínkách.

Po 7letém vývoji, v roce 1998, Yamaha představila nový stroj Rmax. Ten s sebou přinesl výrazné zvýšení funkčnosti a provozuschopnosti. Rmax byl poháněn dvoutaktním dvouválcem o objemu 246cc, který měl výkon 21HP. Velký průlom v ovládní vrtulníku udělal kontrolní systém YACS (Yamaha Attitude Control System), díky kterému mohli Rmax ovládat i nezkušení uživatelé. Tento systém zastaví vrtulník, pokud nepřichází žádné povely od pilota a ten se pohybuje stále na



Obrázek 17 – Rmax II rozměry[16]

jednom místě. S eliminací vibrací a přidáním GPS

Yamaha zjistila, že díky fotografiím může přesně kontrolovat růst plodin z konkrétních míst. To vedlo k další modernizaci a ve 2. čtvrtletí roku 2003 Yamaha představila Rmax II, s kterým dosáhla velkých úspěchů. Současný Rmax není jen stroj k práškování polí, ale jde již o plnohodnotný vrtulník, který se může použít například k monitorování nebo sledování požáru.

Podobný projekt vrtulníku, původně pro využití v zemědělství, později také v armádě, vznikl od roku 1991 v Rusku ve společnosti JSC N. I. Kamova. První bezpilotní vrtulník vznikl za spoluúčasti jihokorejské společnosti Daewoo. Tento stroj obdržel označení Ka - 37 a jeho nosným systémem byly dva sousedé protiběžné rotory. Ka - 37 poprvé vzlétl v roce 1993. Vrtulník byl zkonstruován jako výzkumný stroj pro osvojení si technologií bezpilotních prostředků. V roce 1996 byl prototyp obdarován silnějším motorem, pohyblivou TV kamerou s přenosem záznamu v reálném čase prostřednictvím datalinku a satelitním navigačním systémem. V této podobě prošel rozsáhlými zkouškami a poznatky z výzkumu byly využity při stavbě prvního operačního bezpilotního vrtulníku, označeného Ka - 137.

Vrtulník Ka - 37 byl využíván ke kultivaci zemědělských ploch chemickým postřikem, či ekologickému monitoringu, dále pak také dopravoval léky a sanitární potřeby do nepřístupných a nebezpečných oblastí. Jeho motory dosahovaly výkonu 45kW a umožnily stroji rychlost 110 km/h. Maximální vzletová hmotnost byla 250 kilogramů a užitečné zatížení 50 kilogramů.



Obrázek 18 - Ka - 37[18]

[Zdroj: 16, 17, 18]

Další UAV, používané také policií, je například SensoCopter vyvinutý německou firmou Diehl. Je vybavený GPS a díky snadnému manévrování je vhodný i pro nasazení v městském prostředí. Používá malé elektrooptické kamery schopné přenášet obraz ve dne i v noci. SensoCopter je ovládán přes standardní dálkové ovládání s pomocí displeje. Ve spodní části trupu lze připojit komerčně dostupné senzory. Maximální vzletová hmotnost je 1,1kg. Hmotnost UAV je 900 gramů a lze připojit náklad o hmotnosti 200 gramů. Baterie umožňuje 20 minut letu a efektivní operační rádius je přibližně 500 metrů. [19]



Obrázek 21 – SensoCopter[35]



Obrázek 20 – ovládací stanice pro SensoCopter

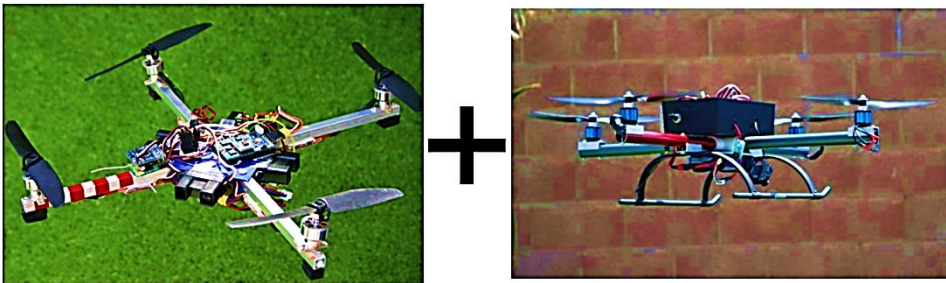
Tento typ UAV lze zařadit do skupiny čtyř vrtulových vrtulníků, tzv. quadcopter nebo quadcopter. Tyto vrtulníky zažily v posledních letech zřejmě největší rozvoj v civilní oblasti UAV. Do podvědomí veřejnosti se dostaly hlavně díky stroji od firmy Parrot. Tato firma v roce 2010 představila helikoptéru AR.Drone, což je Wi - Fi kvadrikoptéra ovládaná pomocí iPhone/iPad/iPod Touch a zařízení s operačním systémem Android, Bada, Symbian. Parrot AR.Drone je určen pro létání venku a ve vnitřních prostorech. Do výbavy Parrot AR.Drone patří dva ochranné kryty, které se mění v závislosti na prostředí, ve kterém se vrtulník právě pohybuje. Pro lety v uzavřeném prostoru je určen ochranný kryt, který chrání vrtule před poškozením v případě nárazu do překážky. Pro venkovní lety je možno použít tvarovaný ochranný kryt, který omezuje vliv větru na letové schopnosti kvadrikoptéry a umožňuje její extrémní manévrovatelnost. Bez krytu lze s AR.Drone dosáhnout i větších rychlostí s rychlou obratností. Zároveň se musí dávat větší pozor, aby nedošlo k nárazu. V tomto režimu nejsou totiž vrtule chráněny před mechanickým poškozením. AR.Drone je dále vybaven dvěma kamerami. Jedna je umístěna na přední a druhá na břiše AR.Drone. Obraz z kamer se pomocí



Obrázek 19 - Parrot AR.Drone[20]

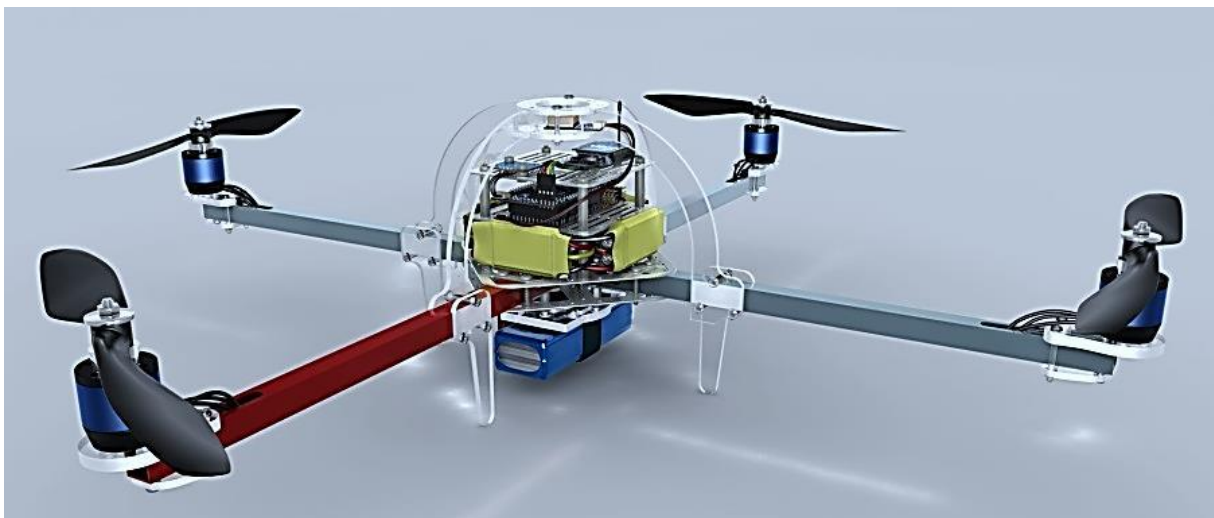
Wi - Fi přenáší na obrazovku zařízení, které je použito jako ovladač. Je tedy možno sledovat situaci před nebo pod vrtulníkem přímo na displeji. Přepínání mezi kamerami se děje pomocí tlačítka k tomu určenému, které je zobrazeno na displeji. Kamery rovněž umožňují nahrávání videa. Video se automaticky ukládá do paměti ovládacího zařízení. Pořizovat lze také i fotografie. Parrot AR.Drone je ovládán baterií o kapacitě 1000mAh, což postačuje zhruba pro 15 minutový let v okruhu 50 metrů. Výška letu bývá omezena na tři metry, ale lze změnit i na vyšší hodnotu. Mezi zajímavé vlastnosti se řadí možnost použití kvadrikopty AR.Drone v rámci sítě. Vygenerovaná Wi - Fi síť umožňuje pohyb několika vrtulníků v blízkém okolí. Ty pak mohou být využity pro tzv. multiplayerové aplikace. Aplikacemi jsou zejména hry, například AR.FlyingAce, AR.Hunter atd.. [20]

Další taková kvadrikopty vznikla spojením DIYdrones s AeroQuad. Toto spojení přineslo na trh produkt s názvem ArduCopter.



Obrázek 22 - DIY Drone + AeroQuad[21]

ArduCopter je snadno použitelná kvadrikopty se systémem ArduPilot Mega vytvořeného společností DIYdrones. Tento vrtulník je řešen jako kompletní UAV a tím se odlišuje od tradičních multirotorových vrtulníků, které ve většině případů podporují jen dálkové ovládání. ArduCopter má plně autonomní schopnosti a lze předem naplánovat mise z pozemní řídicí stanice.



Obrázek 23 – ArduCopter[21]

ArduCopter nabízí možnost, aby si každý sám postavil svůj vlastní vrtulník. Existuje mnoho různých možností, jak si ArduCopter sestavit. Potřebné díly se dělí do dvou kategorií. První kategorie, „povinná,“ obsahuje díly, které jsou potřebné pro základní model, který je schopen samostatného létání. V druhé kategorii jsou volitelné doplňky, které zvyšují využití a funkčnost ArduCopter. K těmto doplňkům patří například optické senzory, ultrazvukové měřiče, fotoaparát. Nejdůležitější součástí tohoto UAV je řídicí jednotka ArduPilot, která autonomně udržuje kvadrikoptéru ve stabilní poloze i při letu. Tato jednotka umožňuje obousměrnou bezdrátovou komunikaci. Software pro řízení je volně šiřitelný a neustále se vylepšuje a aktualizuje. [21]

Mezi multirotorové vrtulníky řadíme také trojrotorové - tricopters, šestirotorové - hexacopters a osmirotorové - octocopters. Zajímavým zástupcem šestirotorových vrtulníků, využívající zajímavý design, je Draganflyer X6. Jeho rotory jsou výsledkem rozsáhlého výzkumu, vývoje a testování. Jsou optimalizovány pro maximální efektivitu, s nízkou hlučností, nízkou hmotností a vysokou pevností.



Obrázek 25 - Draganflyer X6[22]



Obrázek 24 - Draganflyer X8[22]

Rotory pohání střídavé motory pro přímý pohon s maximálním výkonem a efektivitou. Motory jsou připevněny k trojramennému rámu z uhlíkových vláken. Tento unikátní design má nejen maximální tah, ale také minimalizuje zvukový výstup a listy rotoru jsou navrženy tak, aby produkovaly málo turbulencí. Díky všem těmto vlastnostem dosahuje Draganflyer rychlého a přesného manévrování.[22]

1.5 Budoucnost bezpilotních letadel

Vzhledem k faktu, že bezpilotní prostředky jsou využívány především k vojenským účelům, vojenští specialisté usilovně pracují na taktikách jejich bojového nasazení v moderním konfliktu. Z analýz vyplývá, že v případě, kdy budou pevně zakotveny způsoby jejich použití a součinnosti s dalšími zbraňovými systémy, budou bezpilotní prostředky dosahovat mnohem lepších výsledků. Hlavní roli hraje fakt, že v případě bezpilotních prostředků nehrozí riziko ztráty lidských životů a mohou být nasazovány do rizikových misí.

Obecně ovšem platí, že vývoj bezpilotních prostředků bude závislý hlavně na rozvoji výpočetní techniky a technik k ovládní strojů. Nejmodernější stroje dnešní doby jsou ovládány pomocí satelitů a je možno dorozumět se s nimi na jakémkoli místě světa. Americká vláda se proto snaží začlenit bezpilotní letadla do vzdušného prostoru USA, aby mohla plně využívat možností těchto systémů. Letadla jsou schopná sledovat, kontrolovat a potenciálně zničit skupiny nebo jednotlivce. Snahou blízké budoucnosti je vybavení bezpilotních letadel přístroji na rozpoznání obličeje nebo tělesné stavby člověka. Stroje pak budou schopny rozpoznat hledanou osobu a případně ji eliminovat. Vrcholem by mělo být rozpoznání člověka s možnými nepřátelskými úmysly podle nestandardního chování, což může být například zrychlený tep, rozšířené zorničky a jiné projevy lidského těla.

V civilní oblasti se UAV chystají začít plně využívat oddělení policie, pohraniční hlídky a dokonce i elektrárenské společnosti, které by byly schopny kontrolovat každé vedení. Nově diskutovanou oblastí využití bezpilotních prostředků je jejich nasazení při hledání ztracených dětí. Tyto prostředky by měli využívat techniku zmíněnou výše a na základě fotografie budou schopny vyhledat ztracenou osobu. Tyto projekty jsou nyní v začátcích a jejich vývoj může trvat i několik let.

Na území EU se plánují jako kontrolní nástroj v zemědělství, kde budou nahrazovat satelity a provádět kontrolu nad zemědělskými oblastmi. Hlavní výhodou oproti satelitům je jejich operativnost. Dále mohou být vybavena kvalitními kamerami a čidly. Jedinou překážkou je jen legislativa. Po vyřešení legislativy o provozu bezpilotních prostředků lze očekávat jejich rozsáhlé nasazení i v civilním sektoru.

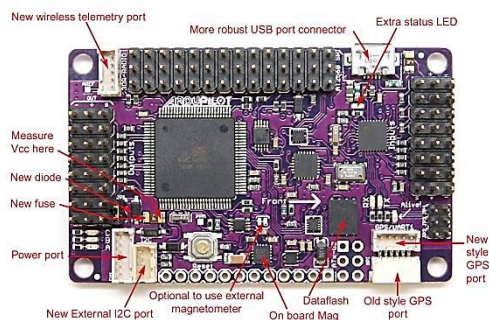
2 Konstrukce kvadrikopty

2.1 Open - source projekty bezpilotních kvadrikopty

2.1.1 Arducopter

Arducopter je snadno použitelný bezpilotní vrtulník. Je založený na platformě ArduPilot Mega vytvořeného komunitou DIY drones. Arducopter obsahuje kompletní řešení pro bezpilotní multirotorové vrtulníky, což ho odlišuje od klasických vrtulníků, které často podporují pouze dálkové ovládání. Systém Arducopter je vybaven plně autonomním způsobem létání, založeném na systému GPS waypointů, které se programují pomocí Google maps pomocí Arducopter GCS.

Arducopter je schopný ovládat všechny multirotorové vrtulníky včetně tradičních tří a čtyřrotorových, až po osmirotorové vrtulníky.



Obrázek 26 - Autopilot Arducopter[23]



Obrázek 27 - GCS (Ground - control software) Arducopter[23]

2.1.2 Openpilot

Projekt Openpilot produkt, který je výsledkem práce komunity nadšených vývojářů z celého světa, kteří mají možnost podílet se na vývoji. Openpilot podporuje jak klasická letadla, tak i vrtulníky a to s použitím naprosto shodné bezpilotní avioniky. Konfigurování a monitorování letu zajišťuje pozemní řídicí stanice s řídicím softwarem Openpilot.



Obrázek 29 - Autopilot Openpilot[23]



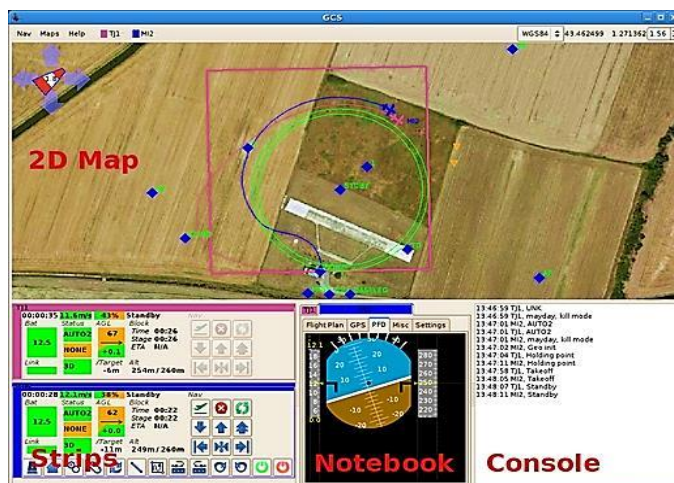
Obrázek 28 - GCS Openpilot[23]

2.1.3 Paparazzi

Paparazzi je velmi rozsáhlý francouzský projekt. Jedná se systém orientovaný na levná bezpilotní letadla všech typů, se záměrem vytvořit neobyčejně silný a všestranný bezpilotní systém. Ve vývoji je od roku 2003. Původně to byl systém pro bezpilotní letadla s pevnými křídly, nyní už je modifikován i pro čtyřrotorové bezpilotní vrtulníky. Paparazzi tým ENAC University vynalezl devět odlišných hardwarových systémů pro bezpilotní letadla. Projekt nabízí obsáhlou a stále se rozšiřující nabídku hardwaru a softwaru pro ovládání, včetně modemů a antén. GCS software je velmi vyvinutý a příjemně se ovládá.



Obrázek 30 - Autopilot Paparazzi[23]



Obrázek 31 - GCS Paparazzi[23]

2.1.4 Pixhawk

Projekt Pixhawk, původně semestrální projekt, který se během šesti měsíců rozrostl do týmu několika studentů. Tento tým byl oficiálně představen v lednu roku 2009. Projekt začínal od nuly na ETH univerzitě v Curychu s podporou počítačové vize mikro UAV. Hlavním cílem tohoto projektu jsou plně autonomní akce bezpilotních vozidel. Jako pozemní řídicí systém Pixhawk využívá Qgroundcontrol, který je vyvíjen s projektem Pixhawk, ale dokáže komunikovat i s jinými open - source projekty.



Obrázek 33 - Autopilot Pixhawk[23]



Obrázek 32 - GCS Pixhawk[23]

2.1.5 Mikrokopter

Mikrokopter je bezpilotní systém vyvinutý jednou pobočkou firmy HiSystems GmbH. Vznikl na konci roku 2006 při snaze vyrobit model kvadrikoptéry. Od té doby se vytvořila velká komunita majitelů a vývojářů po celém světě. Autoři vyvinuli také vlastní regulátory střídavých elektromotorů. V roce 2010 byl Mikrokopter použit při monitorování v Antarktidě. Projekt se řídí konkrétní licencí vývojářů a může být používán pouze pro nekomerční účely.



Obrázek 34 - Autopilot Mikrokopter[23]



Obrázek 35 - GCS Mikrokopter[23]

2.1.6 KKmulticopter

Tento projekt je zaměřen na fanoušky letectví, kteří chtějí pomocí multirotorových bezpilotních prostředků tvořit letecké snímky. Hardware tohoto projektu je nejzákladnější mezi projekty, které jsou zde uvedeny. Je vybaven pouze tříosým gyroskopem a není zde k dispozici žádný software pro pozemní kontrolní stanoviště.



Obrázek 36 - Autopilot KKmulticopter[23]

2.1.7 MultiWii

MultiWii je univerzální software pro ovládání multirotorových RC modelů. Tento projekt používá desku Arduino jako hlavní procesor, ale systém senzorů je možno měnit. Původně byl ale vyvinut pouze s podporou Nintendo Wii gyroskopů a akcelerometrů. Celý projekt je založen na rozvíjení nového vlastního softwaru na platformě Arduino.



Obrázek 37 - Autopilot MultiWii[23]



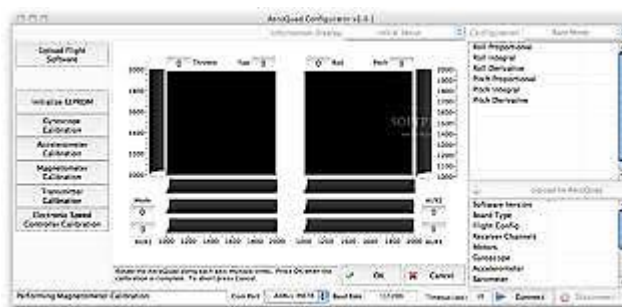
Obrázek 38 - GCS MultiWii[23]

2.1.8 Aeroquad

Aeroquad je čtyřrotorový bezpilotní systém založený na univerzální desce Arduino podobně jako MultiWii. Na tuto desku jsou následně připojovány další destičky a senzory, čímž narůstá velikost celého systému. Arducopter vznikl oddělením z tohoto projektu v květnu roku 2010.



Obrázek 40 - Autopilot Aeroquad[23]



Obrázek 39 - GCS Aeroquad[23]

	Arducopter	Openpilot	Paparazzi	Pixhawk	Mikrokopter	Kkmulticopter	Multiwii	Aeroquad
Rozměry (mm)	66 x 40.5	36 x 36	51 x 25	40 x 30.2	44.6 x 50	49 x 49	N/A ^a	N/A ^a
Váha (g)	23	8,5	10,8	8	35	11,7	N/A ^a	N/A ^a
Procesor	ATmega2560	STM32F103CB	STM32F105RCT6	LPC2148	ATmega644	ATmega168	Arduino ^b	Arduino ^b
Frekvence procesoru (MHz)	16	72	60	60	20	20	8 – 20	8 – 20
Gyroskop	MPU - 6000	ISZ/IDC - 500	MPU - 6000	ISZ/IDC - 500	ADXR5610	ENC - 03	ISZ/IDC - 650	ITG3200
Akcelerometr	MPU - 6000	ADX330	MPU - 6000	SCA3100 - D04	LIS344ALH	–	LIS3L02AL	ADXL345
Magnetometr	HMC5843	HMC5843	HMC5843	HMC5843	KMZ51	–	HMC5883L	HMC5883L
Barometr	MS5611	BMP085	MS5611	BMP085	MPX4115A	–	BMP085	BMP085

a - velikost závislá na konfiguraci hardwaru

b - projekty založené na platformě Arduino a obsahují aktuální procesor ve zvolené verzi

Tabulka 4 - Vlastní komponenty open-source projektů[23]

[Zdroj: 23]

2.2 Avionika

Avionika letadel různých projektů zmíněných v sekci Open - source projektů obsahuje typické komponenty a většina z nich poskytuje také elektronická schémata, pomocí nichž si každý může sestavit svůj bezpilotní prostředek.

2.2.1 Základní komponenty

V následujících odstavcích je rozebrán rozdíl mezi základními a doplňkovými komponenty. V této kapitole jsou vysvětleny základní komponenty, které hrají základní roli ve stavbě UAV, neboť jsou to komponenty nezbytně nutné pro let. Tyto komponenty jsou nabízeny skoro všemi výrobci ve stejné nebo podobné formě. Doplňkové komponenty, které budou popsány dále, umožňují dodatečné funkce a mohou být přidány dodatečně.

Řídící jednotka

Dálkově řízené modely letadel nebo vrtulníků obvykle nemají řídicí jednotku. Toto zařízení nahrazuje přijímač. Ten řídí serva, gyroskopy pro stabilizaci ocasního rotoru a střídavé regulátory pro motory. V případě kvadrikopty není funkce přijímače samotného dostačující k dosažení všech požadavků. To má několik příčin.

- Hlavní důvod je fyzikální. Bez dodatečné podpory senzorů není člověk schopen stabilizovat a řídit kvadrikopty. Při pohledu na osu náklonu pro létání dopředu ze strany, vypadá kvadrikopty jako houpačka se dvěma motory na obou koncích. Pokud oba motory neprodukují přesně ten samý tah, osa se začne otáčet. Pro vyrovnání této rotace se musí na jedné straně zachovat rychlost a na druhé straně snížit manuálně tah motorů.

Podobný problém lze znázornit při pokusu stabilizovat koště, které je na dlani ruky. Vyvažování s rukou jde docela dobře. Zkusme to ale nyní se 40cm dlouhou hliníkovou tyčí stejným způsobem. Toto je více obtížné, protože tyč je menší a pohybuje se rychleji. Stejně je to s kvadrikopty, kde je rozteč vzdálenosti motorů obvykle stejná. Je proto důležité měřit alespoň úhly náklonu kolem os X a Y. Pro let dopředu se musí kvadrikopty naklonit okolo osy Y. Tento úhel náklonu se značí znakem θ nebo anglicky pitch (klopení). Náklonu se dosáhne snížením otáček jednoho páru vrtulí. Náklon do strany je označen znakem φ a nazývá se roll (klonění). Náklonu se dosáhne opět snížením otáček jednoho páru vrtulí na jedné straně. Navíc může být měřen úhel natočení v ose Z, anglicky yaw (zatáčení), který se značí ψ . Tohoto pohybu dosáhneme změnou otáček všech čtyř vrtulí. Řídící jednotka pak sama vyrovnává osu v závislosti na signálu ze senzorů. To znamená, že řídí rychlost motorů, ale mnohem rychleji než dokáže člověk.

- Jak již bylo zmíněno výše, několik pohonů musí společně určitou akci pro pohyb kvadrikopty. To není případ, kdy za manévr je zodpovědný pouze jeden motor a je proto důležitá tzv. "mixing" funkce. Toho je možné dosáhnout pouze s mikroprocesorem v řídicí jednotce a odpovídajícím softwarem.

- Stabilizace řízená senzory (výše zmíněné vyvažování) je realizována pomocí PD jednotek. Parametry P a D musí být přizpůsobeny výběru a dalším kombinacím motorů a vrtulí. Hrají rozhodující roli ve vlastnostech kvadrikopty - rychlost, hbitost nebo je naopak pomalá. Proto je důležité, aby je bylo možné konfigurovat počítačem.
- Konfigurování počítačem umožňuje širší rozsah nastavení parametrů, jako jsou například nouzové funkce po selhání signálu z přijímače, varování při nízkém napětí v bateriích, atd.

Ovládací jednotka proto hraje hlavní roli při stavbě kvadrikopty. V následujícím souhrnu jsou popsány základní funkce, které jednotka zajišťuje:

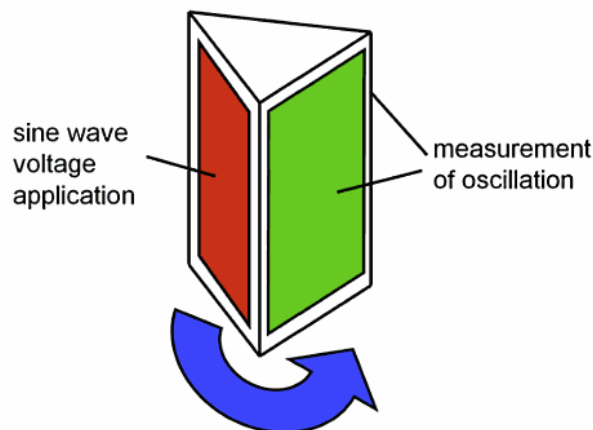
- napájení střídavých regulátorů prostřednictvím centrálního spínače
- výpočet úhlů náklonu v jednotlivých osách použitím senzorů
- kontrola úhlů náklonu pomocí PD jednotek (vyrovnávání)
- výpočet napětí motorů v závislosti na poloze plynu
- signály pro střídavé regulátory
- speciální funkce, například akce po ztrátě signálu z přijímače, signalizace baterií

Senzory

Snímače jsou ve většině kvadrikopty umístěné v obvodu řídicí jednotky. Problémem je měření úhlu náklonu a úhlové rychlosti (pomocí gyroskopu). V závislosti na měření je řídicí jednotka schopna vyrovnávat letadlo samostatně. Dále budou tedy vysvětleny funkce senzorů zrychlení a gyroskopu.

Gyroskop

Většina gyroskopů, které jsou používány v modelech, jsou založeny na účinnosti piezoelektrických elementů. S piezoelektrickými prvky může být použito napětí, které vzniká v důsledku mechanického namáhání nebo obrácený jev, který spočívá v mechanické deformaci způsobené elektrickým napětím. Oba tyto efekty jsou důležité pro správnou funkčnost gyroskopu.

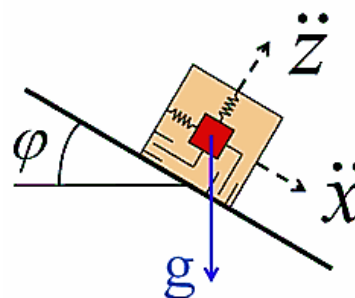


Obrázek 41 - Schematický diagram gyroskopu[01]

Na obrázku výše je znázorněn gyroskop, kde jsou tři piezoelektrické elementy uspořádány do trojúhelníku. Na jednom z nich je aplikováno sinové napětí. Ten vibruje mechanicky. Takzvaný gyroskopický efekt způsobí, že při rotaci začnou vibrovat i ostatní piezoelektrické elementy. Čím větší je rotace, tím větší je vibrace a také větší úhlová rychlost. Intenzita vibrací a tedy i úhlová rychlost mohou být měřeny přímo a jsou úměrné napětí na jednom ze dvou vibrujících elementů. Piezoelektrické prvky jsou vždy náchylné k teplotním změnám. Proto existují různé kalibrační procesy pro kvadriplány s gyroskopy na bázi piezoelektrických elementů. Ty nejnovější gyroskopy jsou založené na technologii MEMS (Micro Electro Mechanical System) a jsou méně náchylné na teplotu.

Akcelerační senzor

Akcelerometry jsou senzory citlivé na zrychlení. Hmotné těleso (závaží) je zavěšeno na tlumících pružinách ve všech třech směrech prostoru. Pokud se soustava nakloní, jak je znázorněno na obrázku níže, gravitační zrychlení g způsobuje posun tohoto závaží.



Obrázek 42 - akcelerační senzor[01]

Složky gravitačního zrychlení promítáme do směrů X a Z. Dvě tečky nad X a Z reprezentují zrychlení. Měření je prováděno kapacitně a pracuje tak, že pohybující se závaží pohybuje kovovou deskou mezi dvěma deskami kondenzátoru, čímž mění kapacitu.

Použitím trigonometrie můžeme vidět:

$$\ddot{x} = g * \sin(\varphi)$$

$$\ddot{z} = -g * \cos(\varphi)$$

pokud $\frac{\sin}{\cos} = \tan$ můžeme psát:

$$\tan(\varphi) = -\frac{\ddot{x}}{\ddot{z}}$$

Navíc, pro malé úhly je tangenta úhlu shodná s úhlem samotným a lze tedy rovnici zjednodušit na:

$$\varphi = -\frac{\ddot{x}}{\ddot{z}}$$

Akcelerační senzory měří obvykle tři rozměry. To je v ose X, Y a Z. Úhel náklonu v ose klopení je měřen komponenty v X a Z, a úhel v ose klonění komponenty v Y a Z.

Kombinace senzorů

Dalo by se jednoduše říci: „Potřebujeme jeden akcelerační senzor pro měření úhlů náklonu (klopení a klonění) a jeden gyroskop pro měření úhlové rychlosti (osa zatáčení).“ To je ale správné tvrzení pouze v případě osy zatáčení. Pro úhly v ose klonění a klopení je to trochu složitější. Při použití gyroskopu a akceleračního senzoru je možné pro výpočet použít buď gyroskop, nebo akcelerační senzor. Oba senzory mají své výhody, ale bohužel i nevýhody. Takže jedině jejich kombinací dostaneme přiměřeně spolehlivé výsledky. Zde si můžeme trochu pomoci fyzikou - úhlová rychlost je časová derivace úhlu. Jinými slovy popisuje změnu úhlu za jednotku času. Odečteme-li numericky signál z gyroskopu, dostaneme integrál, ze kterého získáme úhel. To se provede tak, že signály přidáme v určeném čase. Problém s číselným integrálem je, že se sčítají chyby z integrace a po krátké době vypočítaný úhel neodpovídá úhlu měřenému. Akcelerační senzor poskytuje úhel, ale jedině ve stacionárních případech. Pokud je kvadrokoptéra nakloněna, zrychlení nastane ve směru sklonu a je také samozřejmě změřeno. Takže výpočet úhlu bude špatný. Kromě toho větrné vlivy výsledek také zkreslují. Jedině bez větru a při pohybu konstantní rychlostí je úhel měřený přesně. Pak jsou uvedené vzorce správně. Vývoj v oboru kombinace senzorů je zaměřen na to, jak přesně měřit úhly kombinací gyroskopu a akceleračních senzorů. V praxi bývá obvykle použito jednoduché řešení. Úhel je integrován numericky, jak je popsáno u gyroskopu. Signál z akceleračního senzoru, který často (i když ne vždy) poskytuje dobrý signál úhlu, slouží jako reference pro výpočet integrálu gyroskopického signálu. To zajišťuje, že se úhel neliší tak, jako při numerické integraci. Je zjištěno, že kvadrikoptéra po rychlých manévrech není přesně v rovině. To je proto, že v této poloze nemůže akcelerační senzor přesně měřit úhly. Pak integrovaný signál z gyroskopu je porovnáván nesprávně. Proto musí být gyroskop v každém rotačním směru a pro úpravu úhlu musí být v osách X, Y a Z akcelerační senzor.

Střídavé motory, vrtule

Dnes, střídavé rychlostní regulátory a střídavé motory jsou nejmodernější prvky v konstrukci leteckých modelů. A v případě kvadrikoptéry je tomu také tak. První amatérské kvadrikoptéry pracovaly se stejnosměrnými motory nebo motory s komutátorem. Tato technologie s sebou nesla dvě nevýhody:

- Vzhledem k tomu, že byly použity čtyři motory, bylo důležité snížit hmotnost. Nebo to vyřešit jednoduše a ignorovat limit výkonu. Pak se ale motory hodně zahřívaly a životnost uhlíků byla velmi krátká. V modelu s jedním pohonem to není tak tragické, neboť využívají pouze 80% z plného výkonu vzhledem ke stavu uhlíků. U kvadrikoptéry to znamená, že pokud je jeden motor na konci své životnosti, další tři motory musí snížit rychlost tak, aby bylo možné stabilizovat kvadrikoptéru a udržet ji v rovině. Čtyři motory mají stejný výkon a ten je shodný s výkonem nejslabšího.

- Stejnoseměrné motory nelze použít jako přímé motory pro pohon. Pro soulad mezi motorem a vrtulí se musí přidat ještě převodovka. To ale přináší další navýšení váhy.

Pro shrnutí, použití stejnosměrných motorů s dostatečným výkonem hodně navýšilo váhu modelu. Bylo proto jasné, že tyto motory budou nahrazeny střídavými motory. První kvadrioptéra s tímto pohonem se objevila v roce 2007. Pracovní princip těchto motorů je zde vysvětlen pouze stručně. Na rozdíl od stejnosměrných motorů, jak je patrné i z anglického názvu "Brushless" (bezuhlíkové), neobsahují komutátor. Při otáčení nedochází ke kontaktu mezi rotorem a statorem (uhlíky), ale provádí se elektronicky. Nicméně také potřebujeme speciální elektroniku - regulátor. Ten dodává tři signály proudu posunuté o 120° do třech kabelů pohonu. Vzhledem k tomu, že pohon pracuje bez mechanického kontaktu, jedinou částí, která se opotřebovává, je kuličkové ložisko na hřídeli. Mnoho prvních pilotů kvadrioptér často měnili motory mezi jednotlivými lety. Dnes už to není problém a střídavé motory pracují mnoho hodin a jejich životnost už není problém. Ve většině případů není potřebná ani převodovka. Střídavé motory jsou ve skutečnosti nabízeny jako tzv. inrunner nebo outrunner. Inrunner znamená, že vnější část motoru je pevná a vnitřní část se točí, jak je tomu u stejnosměrných motorů. Outrunner mají rotující vnější část a vnitřní část je nepohyblivá.

Jednou z nejdůležitějších charakteristik střídavých motorů je počet otáček za minutu (rotation per minute - rpm) a napětí (kV nebo rpm/V). Toto číslo ukazuje, kolik otáček udělá pohon za minutu v závislosti na použitém napětí na vstupu střídavého regulátoru. Jako příklad je zde uveden motor s 1000rpm/V a 10V na vstupu regulátoru. Tím získáme $10\text{V} \times 1000\text{rpm/V} = 10\,000\text{rpm}$. Číslo udává počet otáček při volnoběhu, bez vrtule.

V charakteristice kV nebo rpm/V jsou outrunner hlouběji než inrunner. To z nich tvoří atraktivní motory pro přímý pohon vrtulí a mnoho modelů létá s těmito pohony.

Poměr tah-hmotnost

Typická konstrukce kvadrioptéry má poměr tah-hmotnost 3:1. To znamená, že maximální dosažitelný celkový tah se čtyřmi motory a vrtulemi je třikrát větší než jeho vlastní hmotnost. Pokud kvadrioptéra s 30g motory a 8" vrtulemi má maximální tah 1200g, tak její vlastní hmotnost by neměla překročit 400g. Na první pohled se tento poměr může zdát vysoký a dalo by se věřit tomu, že polovina tahu by měla stačit. Experimenty ukazují, že kvadrioptéra pak jen stěží levituje, pokud je bezvětří. Proto je potřebný přebytek o faktor minimálně 2, aby byl dodatek energie pro vyrovnávání při větrných nárazech, turbulencích, apod. Poměr tah-hmotnost 2:1 by mohl kvadrioptéru udržet v rovnováze docela dobře. Je-li faktor zvýšen na 3:1, je podpořeno větší zatížení, jako je třeba vlastní hmotnost, nebo je možný rychlý let či otáčení.

Při poměru 3:1 je pak 2/3 z možného tahu častá rezerva. Navíc při pohledu na motor vidíme, že je v proudu vzduchu od vrtule. To má mimo jiné tu výhodu, že pohony jsou obvykle jen vlažné během visení i při rychlém letu. Tím se zvýší účinnost systému, protože motor při tahu produkuje málo tepla a to přispívá k dlouhé životnosti motoru.

Střídavé regulátory

Střídavé motory jsou vždy řízeny střídavými regulátory. To je nutné z důvodu speciálního ovládní měniče se střídavým proudem. Tyto regulátory jsou k dispozici pro modely letadel od mnoha výrobců. Jsou napájeny stejnosměrným napětím na vstupní straně a, jako serva, jsou připojeny přímo k přijímači. Přijímač jim poskytuje s šířkově modulovaným pulzním signálem odkaz na rychlostní hodnoty, odpovídající poloze plynu na dálkovém ovládní. Regulátory pak mění napětí na třífázové střídavé napětí pomocí tranzistorů řízených elektrickým polem (Field Effect Transistors - FET). Pokud potřebuje pohon větší otáčky, zvyšuje se frekvence a amplituda střídavého napětí tak, že následuje zvýšení rychlosti.

Střídavý regulátor má tedy následující úkoly:

- vyhodnocení signálu rychlostního odkazu z přijímače
- přeměna napětí do třífázového střídavého signálu
- spuštění otáček motoru z odkazu rychlosti

Většina výrobců kvadrikoptér nabízí své vlastní střídavé regulátory. Jelikož objem prodeje není tak velký, nemohou cenově konkurovat standardním střídavým regulátorům. Ale důvod, proč nemohou být standardní střídavé regulátory použity, je popsán dále.

S letovým modelem není důležité, zda střídavý regulátor motoru zrychluje motor v 10 nebo 100 milisekundách na požadovanou rychlost nebo zda to udělá až po sekundě. Tahu je pak dosaženo jen trochu později. Nicméně, jak je popsáno výše, střídavý regulátor v kvadrikoptéře je zodpovědný za to, že signály z řídicí jednotky budou rychle realizovány v motoru. Pokud to nebude zajištěno, je ohrožena stabilní levitace. Modulované signály jsou příliš pomalým způsobem komunikace. Tento problém lze vyřešit různými způsoby. Buď přidáním softwaru pro střídavé regulátory, čímž se zvyšuje rychlost komunikace, nebo se používá zcela odlišné rozhraní.

V různých systémech kvadrikoptéry je nastavena I2C (I-square-C) sběrnice. To je dvouvodičové vedení, které vychází z řídicí jednotky a spojuje všechny čtyři střídavé regulátory. Přenos rychlostního odkazu je sériový. Všechny střídavé regulátory jsou následně označeny adresou a aktualizují se s jejich novou rychlostní hodnotou.

Kapacitor

Ve všech střídavých regulátorech, je poměrně velký kapacitor. Je zapojen mezi kladným a záporným napětím zdroje a vyhlazuje poklesy napětí, když motor vyžaduje větší proud na krátkou dobu. Jeho funkce je důležitá, protože tyto poklesy napětí by mohly zablokovat komunikaci s řídicí jednotkou. Pokud se rozbije jednotka střídavých regulátorů, je důvodem často právě tato komponenta.

Lithium-polymerový akumulátor

Elektrické pohony se staly úspěšnými pouze s vývojem účinných akumulátorů pro letecké modely. Před 25 lety bylo pouze jen několik kluzáků s pomocnými elektrickými motory. Ty byly poháněny nikel-kadmiovými (NiCd) akumulátory. Později přišly nikel-metal hybridní (NiMH) akumulátory a v posledních letech se rozšířily lithium-polymerové (LiPo) akumulátory. Během této doby se zvýšila kapacita energie na jednotku hmotnosti asi pětkrát. Tento vývoj je také užitečný pro kvadrikopty.

LiPo akumulátor má také některé speciální vlastnosti. Jeden elektrický článek má nominální napětí 3,7V. Obvykle jsou sériově zapojeny tři nebo čtyři elektrické články, což vede k nominálnímu napětí 11,1V nebo 14,8V. Vybití pod 3,0V na elektrický článek není dobré ani pro akumulátor a proto se používá varovného systému pro stav baterií. Ten je většinou nastaven na řídicí jednotce počítačem. Když klesne hodnota napětí pod určitou hranici, rozsvítí se varovný signál, který může být doprovázen zvukovým efektem. Nabíjení se rovněž provádí jiným způsobem, než jak tomu je u NiCd nebo NiMH baterií. Například tříčlánek LiPo akumulátor, ve kterém je alarm nastaven na hodnotu 9,0V. Pokud jeden článek má 3,0V a další dva mají 3,3V, je jasné, že vzhledem k součtu 9,6V, varování nebude aktivováno. Baterie vypadá téměř plná. Pokud budeme pokračovat v létání, varování se aktivuje při $3 \times 3V = 9V$. Pak první článek má okolo 2,8V a další dva mají 3,1V. Problémový článek je už skoro vybit a snižuje se jeho životnost.

Multi-článekové akumulátory mají proto tzv. "balancer". To je zařízení, které je zapojeno mezi nabíječkou a akumulátorem. Zajišťuje, aby všechny články po zatížení měli stejné napětí. Tím je do značné míry zabráněno nebezpečí příliš nízkého napětí na článku. Proto je nutný konektor, který řídí kladné a záporné póly všech článků zapojených do série. Hluboké vybití a přebíjení rozkládá anodu a vytváří se vodík, který pak nafoukne článek. Nafouklé články jsou znak pro výměnu akumulátoru. Také v případě mechanického poškození, prohnutí, atd. by měl být akumulátor vyměněn za nový.

Dimenzování

Dimenzování je závislé na celkové hmotnosti, zatížení, motorech a požadované délce letu. Pro zjednodušení, s 8" nebo 10" vrtulemi se očekává okolo 100W výkon na kg

hmotnosti a při předpokladu 20 minutového letu, jsou níže uvedeny dva příklady dimenzování s tříčlankovými LiPo akumulátory.

Motor o hmotnosti 30g s 8"x4" vrtulemi a maximálním tahem 4x300g=1200g

maximální hmotnost 400g (3:1)

$$\frac{100W}{1000g} \times 400g = 40W - \text{výkon}; \frac{40W}{11,1V} = 3,6A - \text{proud pro levitaci}$$

Baterie: 3,6A x 0,33h = 1200 mAh

Motor o hmotnosti 60g s 10"x4" vrtulemi a maximálním tahem 4x600g=2400g; maximální hmotnost 800g (3:1)

$$\frac{100W}{1000g} \times 800g = 80W - \text{výkon}; \frac{80W}{11,1V} = 7,2A - \text{proud pro levitaci}$$

Baterie: 7,2A x 0,33h = 2400 mAh

Do celkové hmotnosti kvadrikopty se zahrnuje samozřejmě i hmotnost akumulátorů.

Dálkové ovládání a přijímač

Dálkový ovladač je pro mnoho konstruktérů jedním z nejdůležitějších zařízení. Zde nastavují vlastnosti svých modelů. Tímto ovládají serva křidélek, ocasní křídlo, plyn, atd. Proč je tomu tak? Vzhledem k tomu, že v typickém letadle nebo vrtulníku je ve skutečnosti pouze přijímač a ten má omezené nebo žádné možnosti nastavení. Moderní dálkové ovládání má tedy vlastní paměť, takže mohou být nastaveny pro několik různých modelů. Pokud je to nutné, může být snadno změněn z jednoho modelu na druhý stisknutím tlačítka. S kvadrikoptérou je to jiné. Řídící elektronika obsahuje také mikroprocesor. Tak mohou být nastavení stáhnuta přímo z počítače. To znamená, že nejsou nutné speciální funkce dálkového ovládání a celé nastavení je uloženo v mikroprocesoru zařízení. Na rozdíl od pilotů modelů letadel a vrtulníků, kteří konfigurují dálkové ovládání pro model, pilot kvadrikopty nastavuje model pro dálkové ovládání.

PC rozhraní

Vzhledem k tomu, že všechno lze nastavit na počítači, je nutné komunikační rozhraní. Na straně počítače je USB rozhraní. Signály z USB rozhraní jsou převedeny na signál kompatibilní s řídicí elektronikou. V počítači pak lze spustit konfigurační program, který se dá stáhnout z internetu. Program nabízí možnost nastavit parametry a má své specifické diagnostické schopnosti. Lze sledovat data naměřená senzory nebo signál z dálkového

ovládání. Je také možné povolit spuštění pohonů. To je vynikající nástroj při řešení problémů, protože program velmi rychle zjistí, co nefunguje.

Konstrukce rámu

Rám nese všechny komponenty, motory, vrtule, řídicí jednotku, střídavé regulátory, baterie, přijímač a jeho konstrukce bývá podceňována. Má stejnou funkci jak trup modelu letadla. U kvadrikopty která nemá požadované chování při letu, může být rám příčinou problému. Jeden z problémů jsou například nedostatečně pevně připojené pohony, řídicí elektronika se senzory vibruje, kabel antény je omotán kolem rotujících motorů, apod. Při stavbě rámu je potřeba zvážit konstrukční provedení.

Crash-safe rám nebo rám s předem určeným místem zlomu

Pro pilota, který je orientován na rychlé lety, se doporučují crash-safe rámy. Tyto rámy lze koupit v několika obchodech. Rámy jsou obvykle navrženy v některém CAD systému a většinou jsou mechanicky testovány. Často bývá použit materiál, který byl až do nedávna vyhrazen pouze pro odborníky - uhlík. Ten je charakterizován tím, že je velmi silná, ale také lehký. Takže je pro tyto účely ideální. Elektronika a baterie jsou chráněny kovovým pouzdem, přičemž nosič se skládá ze sendviče, který tvoří lepené balzové dřevo mezi uhlíkovými deskami. Střídavé regulátory jsou připevněny zespoda. Cena takovýchto rámu bývá vysoká.

Rám může být méně bezpečný, pokud je alespoň trochu tuhý. Do této kategorie řadíme rámy, které si můžeme sestavit sami. Jde o tzv. "Do - it - yourself shop frames". Všechny tyto komponenty lze nalézt na DIY home. Hardware takových rámu by měl být navržen tak, že pokud se něco rozbije, nesmí být poškozena žádná drahá elektronika nebo pohony. To znamená, že potřebují mít předdefinovaná zlomová místa (body).

Velikost rámu

Rám určuje velikost kvadrikopty. Důležitým ukazatelem je vzdálenost mezi dvěma protilehlými hřídely motorů. Často je slyšet termín kvadrikopty třídy 30,40 nebo 50. Tyto čísla označují vzdálenost v centimetrech. Dále je důležité, aby vrtule rotovaly volně. Rám ale nemá vliv na hladkost vyvažování. Pouze kvalitní snímače měření, motory, vrtule a parametry regulátorů ovlivní vyvažování.

Pro velikost rámu platí jednoduché pravidlo:

8" vrtule potřebují rám třídy 30-40

10" vrtule potřebují rám třídy 40-50

12" vrtule potřebují rám třídy 50-60

Vždy také závisí na tom, kde budou umístěny střídavé regulátory. U většiny ráků je nosná plocha dostatečně velká, že je zde dost prostoru pro regulátory. V těchto případech bude střed menší, jelikož se na něj umístí pouze řídicí jednotka, přijímač a baterie. Vzdálenost mezi dvěma hřídeli je pak menší.

Kabeláž

Mnoho výrobců popisuje zapojení svých výrobků na internetu. Elektrická instalace musí být provedena ve tvaru hvězdy, což znamená, že každý řídicí regulátor dostane samostatně dva (+/-) kabely napájení z řídicí jednotky nebo přímo z akumulátoru. I2C nebo šířková modulace, která předává informace z řídicí jednotky do střídavých regulátorů, je umístěna tak daleko od napájecích kabelů, jak je umožněno rámem.

Bezpečnost

Technologie je zajímavá, ale je také důležité zachovat bezpečnost. Stejně jako každý vrtulník, kvadrikoptéra má také vrtule, které jsou připevněné horizontálně. Tyto vrtule jsou často velmi tvrdé a může dojít k nehodě při nekontrolovaném pádu kvadrikoptéry. Takový dopad může mít i katastrofální následky na lidském zdraví. Bezpečnost je tedy jeden ze základních prvků. Pro zajištění bezpečnosti se používají kroužky vyrobené z polystyrenu nebo z uhlíkových vláken.

2.2.2 Doplnkové komponenty

Pilot řídící kvadrikoptéru se základními komponenty, drží v ruce systém, který má podobné ovládací prvky, jako helikoptéra. Zaprvé může ovládat rychlost letu naklopením modelu o určitý úhel a tím se vytvoří směr letu. A zadruhé může s modelem levitovat na jednom místě. S kontrolou úhlu v osách klopení a klonění a měření úhlové rychlosti v ose otáčení, je možné ovládat model pomocí dálkového ovládacího systému a sledovat jeho postupné oddalování. A navíc, existují mnohem lepší způsoby ovládacího systému, přidáním dalších senzorů.



Obrázek 43 - šest stupňů volnosti tělesa v prostoru[01]

Obecně má těleso ve vesmíru šest stupňů volnosti. Tímto způsobem jsou definovány možnosti pohybu. Jak je vidět na obrázku, jsou zde tři stupně volnosti rotace (klopení, klonění, vybočení) a tři stupně volnosti posuvu ve směru os (x,y,z) . Použitím základních komponent je ve skutečnosti řízeno samotným modelem několik málo stupňů volnosti. Dva rotační stupně volnosti - klonění a klopení. Létání se tedy stává zábavné proto, že pilot může orientovat svůj model tak, jak chce. Technicky to znamená, že si sám určuje úhel natočení v x , y a z . Dnešní technologie umožňují měření a ovládání všech šesti stupňů volnosti. Kvadrioptéra je tak schopna autonomního létání a je schopna stabilního pohybu na jednom místě ve vzduchu. V následující části budou popsány senzory potřebné pro měření a ovládání požadovaných stupňů volnosti.

- *Senzor tlaku vzduchu - požadovaný pro stupeň volnosti ve směru z*
- *Kompas - požadovaný pro absolutní měření úhlu v ose zatáčení (gyroskop měří pouze úhlovou rychlost)*
- *GPS - požadovaný pro dva stupně volnosti posuvu ve směru x a y*

Měření těchto čtyř stupňů volnosti mohou být přidány k dvěma stupňům volnosti již měřených a kontrolovaných základními komponenty.

Senzor tlaku vzduchu

Tyto senzory měří tlak vzduchu v závislosti na nadmořské výšce. Tlak vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou klesá. Referenční tlak tlačí na jedné straně membrány a tlak vzduchu na straně druhé. Pokud se to změní, dojde k narušení membrány a tenzometr změní elektrické napětí. Vzduch proudí otvorem uprostřed ve směru membrány. Nejen změna výška vede ke změně tlaku v senzoru. Další faktory, jako je například proud vzduchu vrtulí nebo větrné nárazy to mohou také způsobit. To je důležité zohlednit při montáži. Vhodné místo může být na řídicí jednotce s otvorem nahoru nebo dolů.

Kontrola výšky

Existuje několik způsobů, jak kontrolovat výšku. Jedna z variant je v případě, že páčka plynu je ve střední poloze. Kvadrioptéra pak drží výšku, které dosáhla. To je zajištěno tahem motorů. Pokud je páčka plynu nad touto pozicí, bude dosaženo stoupavého letu a pokud je pod touto pozicí, bude klesat. Ve druhé variantě musí být páčka plynu přesunuta tak, že letadlo začíná stoupat. Pokud páčka na dálkovém ovladači není přesunuta, kvadrioptéra drží výšku a řídí tah sama. Pokud je pak plyn stažen, dojde ke klesání. Přesune-li se páčka opět nahoru kvadrioptéra začne opět stoupat. Jakmile je dosaženo požadované výšky, Kvadrioptéra opět drží tuto výšku. V obou variantách, řízení výšky může být zapnuto či vypnuto doplňkovým programem dálkového ovládání. To má tu výhodu, že pilot může sám rozhodnout, kdy kvadrioptéra bude regulovat výšku sama nebo kdy on sám má plnou kontrolu nad páčkou plynu a tahem vrtulí.

Kompas

Pokud jsou používány pouze základní komponenty, gyroskop měří pouze úhlovou rychlost v ose zatáčení (ne úhel). Když je ovládací páčka na dálkovém ovládní držena ve střední poloze, to znamená, že je v nulové poloze a že úhel nebude změněn. Předek by pak měl zůstat vždy na stejném místě. To je pravda jen teoreticky.

V praxi gyroskop měří úhlovou rychlost jako nulovou, i když ve skutečnosti není přesně nulová. Tomu nemůže být zabráněno kvůli teplotním účinkům. Kalibrace gyroskopu před letem také nepomůže. Pokud by chtěl pilot pomalu a málo natočit kvadrikoptéru nebo držet předek na stejném místě, musel by si pomoci jako u modelů vrtulníků tzv. protipohybem.

Pokud je požadováno, aby kvadrikoptéra držela předek na stejném místě při nulovém natočení v ose, je potřeba doplňkového senzoru, který se nazývá kompas. Ten neměří relativní pohyb k zemi, ale absolutní orientaci. Mnoho elektronických kompasů funguje na základě Hallových senzorů. Hallův jev je výskyt elektrického napětí v polovodiči, který je umístěn v magnetickém poli. Země vytváří magnetické pole mezi severním a jižním pólem, který je rovněž zodpovědný za to, že strelka kompasu se vždy točí na sever. V závislosti na prostředí se ale může stát, že bude strelka vychýlena. Například v uzavřené místnosti s železnými zdmi, v oblasti vedení napětí, atd. Elektrický kompas může být také ovlivněn prostředím. Je proto důležité, aby byl před tímto rušením ochráněn nebo je eliminovat jinými vhodnými opatřeními. Proto by měl být kompas montován od řídicí elektroniky tak daleko, jak je to jen možné

Řízení úhlu v ose zatáčení

Stejně jako v případě měření výšky, je zde také několik možností měření absolutního úhlu. Je-li páčka ve středové poloze nebo se jen mírně od ní odchyluje, je úhel řízený kompasem a aktuální absolutní úhel je zachován. Pokud se páčka vychýlí dostatečně daleko doprava nebo doleva, je regulován pomocí gyroskopu. Má to za následek i to, že čím dále je páčka od středové polohy, tím rychleji se otáčí předek kvadrikoptéry. Kompas a senzor zrychlení, které měří úhel zatáčení a úhly klopení a klonění, mají zajímavou shodnost. U obou typů senzorů jsou úhly měřeny ve světovém souřadnicovém systému. Jinými slovy, pomocí těchto senzorů je úhlová poloha kvadrikoptéry měřena ve vztahu k Zemi. V případě kompasu se měří magnetické pole mezi severním a jižním pólem Země. V senzoru zrychlení je referenční gravitační zrychlení, které směřuje ke středu Země.

GPS

- dává světové souřadnice v zeměpisné šířce a délce a umožňuje kontrolovat kvadrikoptéru v ose x a y.

GPS, Global Positioning System, má vliv na každodenní život lidí mnoho let. Elektronické navigační systémy jsou nyní standardem v mnoha vozidlech.

GPS se skládá z několika satelitů obíhajících Zemi. Jejich přesná poloha je vždy známá. Každý satelit je vybaven atomovými hodinami a vysílá signál v určitých časech. Tento signál obsahuje také jeho identifikaci. Pozemní stanice, navigační zařízení nebo čip v kvadrioptéře měří čas běhu přenášených signálů. To je doba, která uplyne mezi vysláním signálu přes satelit a jeho příjem. Tímto způsobem je možné určit svou vlastní pozici. Doba běhu vynásobená rychlostí letu je vzdálenost od satelitu. K lokalizaci konkrétního místa na zemi by měli být k dispozici minimálně tři satelity ve stejný okamžik. Pro přesné měření času, musí být pozemní stanice vybaveny také atomovými hodinami, takže všechna zařízení používají stejnou časovou základnu. V praxi by ovšem taková zařízení byla drahá a navigační elektronika hodiny neobsahuje. Pro určení polohy je pak potřebný signál ze čtvrtého satelitu. Díky speciálním algoritmům pak pozemní stanice dokáže vypočítat zeměpisnou délku a šířku sama.

Řízení x a y

S nejjednodušší verzí lze funkci GPS zapnout a vypnout pomocí přepínače na dálkovém ovládní. Pokud je zapnuta a páčky pro klopení a klonění se nachází uprostřed, kvadrioptéra řídí úhly sama a drží svou pozici v x a y. Pokud je páčka vychýlena daleko od středu, pilot získá plnou kontrolu nad řízením těchto úhlů. Signály GPS lze měřit pouze venku. V interiérech řízení souřadnic x a y nefunguje.

Širší technické možnosti

Pokud jsou všechny senzory - gyroskopy, akcelerační senzory, senzor tlaku vzduchu, kompas a GPS - zapnuty, kvadrioptéra zůstává na stejném místě ve vzduchu. Všech šest stupňů volnosti tělesa v prostoru je kontrolováno samostatně. Tato technika nemá téměř žádné limity. Například jako dálkové ovládní může sloužit počítač s příslušným softwarem. Tzv. "way pointy" mohou být určeny a kvadrioptéra samostatně tyto body postupně proletí.

Fotoaparát, nahrávání videa

Jednou z motivací pro rozvoj kvadrioptér byla možnost výroby fotografií nebo filmů z nových, téměř libovolných pohledů. První profesionální uživatelé byli policisté a hasičské sbory, kteří byli schopni fotografovat scény nehody nebo požáry z libovolného úhlu. Dnes slouží kamery ke kontrolování mnoha různými způsoby. Například kontrola vysokých mostů při stanovení korozního poškození nebo trhlin, které nejsou viditelné zdola.

Fotoaparát

Existuje mnoho fotoaparátů na trhu, které jsou vhodné pro použití v kvadrikoptéře. Je důležité dávat si pozor především na dvě věci - hmotnost a schopnost elektronicky vyvolat obrazy. Jako pravidlo pro hmotnost může být použit vztah, že kamera může být o něco málo těžší, než polovina hmotnosti kvadrikoptéry bez kamery. Zde stačí poměr tah-hmotnost 3:1.

Pro kvadrikoptéru vážící 400g bez kamery, musí mít kamera maximální hmotnost 250g.

Pro kvadrikoptéru vážící 800g bez kamery, musí mít kamera maximální hmotnost 500g.

Tím je poměr 3:1 snižen na méně než 2:1. Je zde tedy ještě dost síly fotit, pokud se kvadrikoptéra vznáší.

Držák fotoaparátu

Konstrukce držáku může být podle potřeby různě složitá. V nejjednodušší variantě je kamera přišroubována ke dvěma deskám (nosičům). To má tu výhodu, že kromě upínacích šroubů není zapotřebí žádné zvláštní zařízení. Nevýhodou je nedostatečná ochrana v případě nehody a úhel pohledu je nastaven před letem. To omezuje možnosti fotografování. Složitější varianta je otočné zavěšení. Kamerou lze pohybovat servem. Ještě složitější je tzv. Gimbal, který umožňuje naklonění ve dvou směrech. Většina řídicí elektroniky má přídavné servo výstupy, které mohou být nastaveny počítačem. Namontované otočné držáky fotoaparátů jsou navrhovány tak, aby se mohli připevnit pod kvadrikoptéru a fotoaparát byl dostatečně chráněn. Při tomto připevnění nejsou v obrazech žádné vrtule ani motory. Je potřeba mít na paměti hmotnost. Kvadrikoptéru je pro tyto účely nutné navrhnout větší, aby bylo větší užitečné zatížení.

Obousměrné propojení, videobrýle

Na základě 2,4GHz jsou videokamery, které přenášejí obraz bezdrátově k počítači a jsou schopny přijímat z něj příkazy. Lehké verze těchto zařízení jsou ideální pro použití v kvadrikoptérách. Je možné začít nahrávat příkazem z počítače, prezentovat film a právě přijatá obrázková data na obrazovce a uložit na pevný disk. Zvláštní kombinací jsou videobrýle a kvadrikoptéra. Videobrýle pracují na principu popsaném výše, jen signál videa není přenesen do počítače, ale na displej v brýlích. Časové zpoždění přijímaného signálu je rozdílné v každých brýlích. Pro multimediální aplikace to není až tak velká nevýhoda. Ale pro ovládání kvadrikoptéry je nezbytné zajistit, aby zpoždění nebylo příliš velké - ne více jak 0,2 sekund.

2.3 Mechanika létání

Níže bude vysvětleno, proč vlastně kvadrikoptéra létá, jak se realizuje samo-vyvažování a jak nastavit parametry regulátoru tak, že dosáhne určeného úhlu náklonu v osách klonění a klopení.

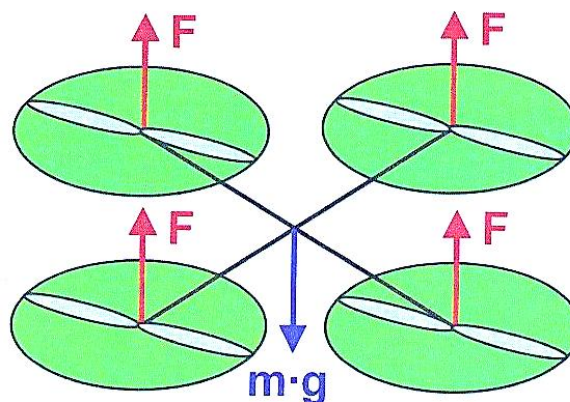
Vznášení

Na obrázku je rozložení sil při normálním visení. Lze zde aplikovat fyzikální zákon akce a reakce. Při vznášení je součet čtyř vzhůru směřujících sil roven dolů směřující síle. Síly F mířící vzhůru jsou vytvořeny čtyřmi vrtulemi a jejich součet je pak jedna tahová síla. Síla směřující dolů je tíhová síla (hmotnost m vynásobená gravitačním zrychlením g).

$$4 * F = m * g$$

Pro stoupaní musí být tah větší než tíhová síla a při klesání je to naopak.

$$4 * F > m * g$$

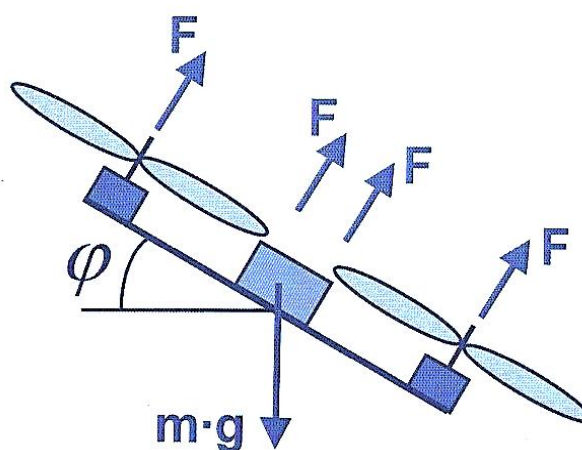


Obrázek 44 - Rozložení sil při vznášení[01]

$$4 * F < m * g$$

Úhel náklonu φ

Pokud pilot nakloní jeho kvadrikoptéra o nějaký úhel ve směru klonění nebo klopení, začne být unášena na jednu stranu a je umožněn pohyb ve směru osy x- nebo y-. Na obrázku 45 je kvadrikoptéra zobrazena ze strany. Kvůli symetrii je zobrazení osy klonění a klopení totožné. Samozřejmě jsou zde stále čtyři síly. Prostřední dvě jsou od dvou vrtulí.

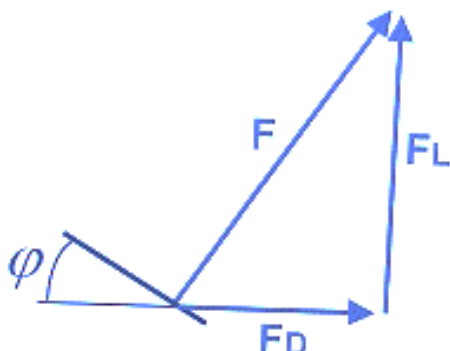


Obrázek 45 - Síly při úhlu náklonu φ [01]

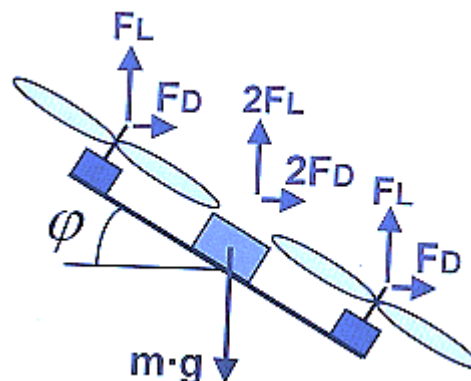
Tahové síly směřují stále stejným směrem jako hřídele motorů a tíhová síla je stále v těžišti a směřuje k Zemi. Síly již nejsou proti sobě, jak tomu bylo v případě čistého vznášení. Vektor síly F lze rozložit na součet ostatních sil. Sílu F rozložíme do svislé a vodorovné složky tak, že všechny tři síly tvoří uzavřený trojúhelník. F_D (drift force) je unášecí síla a působí ve vertikálním směru. Síla F_L (lift force) je vztlaková síla a působí ve vertikálním směru.

Čtyři vztlakové síly opět působí přesně proti tíhové síle. Pro zachování výšky při letu musí opět platit:

$$4 * F_L = m * g$$



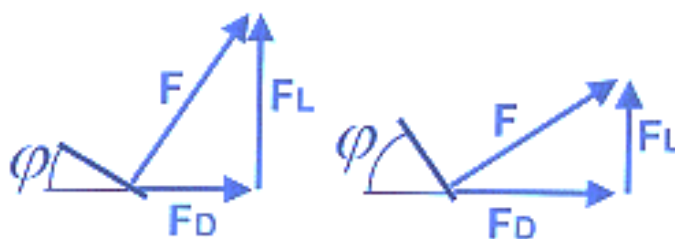
Obrázek 46 - Tahová síla F , vztlaková F_L a unášecí F_D [01]



Obrázek 47 - Rozložení sil [01]

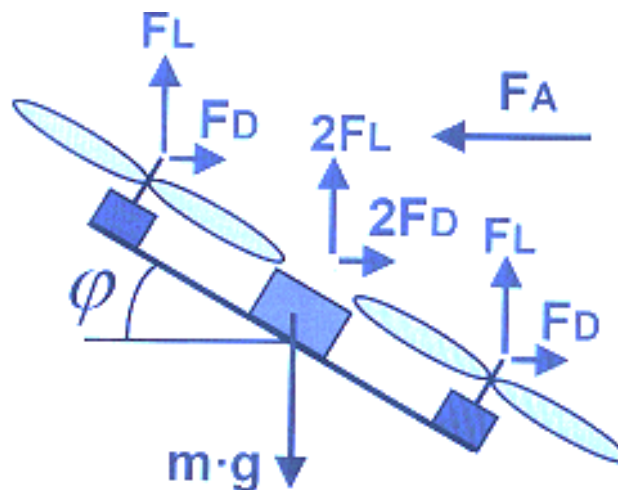
Silový trojúhelník z obrázku 46 je pravouhlý. Je vidět, že tahová síla F je vždy nejdelší stranou, přeponou. Je vždy větší než vztlaková a unášecí síla a poloh páky plynu má na tuto sílu vliv. Pokud je kvadrioptéra nakloněná o úhel φ , podle výše uvedeného vztahu místo síly F působí proti tíhové síle menší vztlaková síla F_L . Beze změny polohy plynu kvadrioptéra začne klesat a je unášena do strany (nebo dopředu, to záleží na tom, v jaké ose je nakloněna). To lze kompenzovat zvýšením plynu, ale pouze v případě, že je ovladač výšky a tlakový senzor vypnutý. Pokud jsou zapnuty, pak bude vždy dodržen vztah $4 * F_L = m * g$ a kvadrioptéra bude držet stejnou výšku.

Obrázek 49 ukazuje, jak se mění rozložení sil, při různém úhlu φ . Je patrné, že vztlaková síla F_L při větším úhlu náklonu φ a konstantním tahu F klesá a síla F_D se zvětšuje. Kvadrioptéra je pak rychleji unášena do strany a pro udržení výšky musí být přidáno více plynu.



Obrázek 48 - Silový trojúhelník při různém úhlu φ [01]

Prošetřeme zde opět zákon akce a reakce. Tento zákon je ve výše uvedených obrázcích porušen. Čtyři vertikální síly F_L mají proti sobě tíhovou sílu $m \cdot g$. Ale horizontální síla F_D , jak je vidět, nemá proti sobě žádnou reakční sílu. Pokud aplikujeme sílu F na těleso v prostoru, pak působící síla je $F = m \cdot a$ (hmotnost x zrychlení). Těleso je proto stále zrychlující se zrychlením $a = \frac{F}{m}$. Samozřejmě také

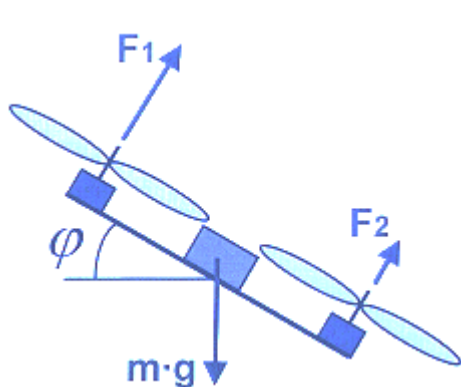
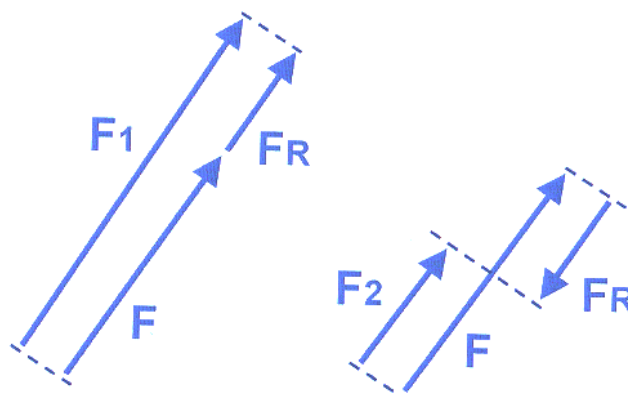


Obrázek 49 - Zobrazení všech sil[01]

platí vztah pro rychlost $v = a \cdot t$ (zrychlení x čas). Pokud by platily všechny vztahy, boční rychlost by se plynule zvyšovala. V praxi je to samozřejmě jiné. Ve skutečnosti je kolem kvadrikopty nepostradatelná věc, díky které mohou vrtule vygenerovat tah. Ta věc se nazývá vzduch. Pokud je tedy plyn dlouhou dobu stlačen, pak od určitého bodu už kvadrikopty plynule nezrychluje. Proti čtyřem silám F_D totiž působí aerodynamická síla (síla odporu prostředí F_A). Síla F_A se zvětšuje s rostoucí rychlostí a od určitého okamžiku má stejnou velikost jako $4 \cdot F_D$. Pak je dosaženo maximální rychlosti.

Obecná rovnováha sil

Příčina, která umožní naklonění kvadrikopty o úhel φ , nebyla zatím brána v úvahu. To vyžaduje projednání sil v obecném případě. Naklonění je možné provést se dvěma protilehlými motory. Na obrázku 50 je zobrazen jeden obecný případ, kdy síla F_1 není stejně velká jako síla F_2 . I v tomto případě lze síly F_1 a F_2 rozložit do dvou dalších sil. Podobně jako tahová síla F byla rozložena do dvou sil F_L a F_D .

Obrázek 51 - Obecný případ $F_1 \neq F_2$ [01]Obrázek 50 - Rozložení síly F_1 a F_2 [01]

F_1 a F_2 jsou rozloženy do dvou sil F a F_R . F je opět dříve zmiňovaná tahová síla a F_R rotační síla.

Je jasné, že: $F_1 = F + F_R$

$$F_2 = F - F_R$$

Tento vztah může být upraven tak, že jsou vypočteny síly F a F_R ze zadaných sil F_1 a F_2 .

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

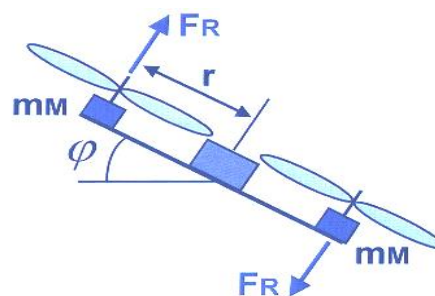
$$F_R = \frac{F_1 - F_2}{2}$$

Účinek tahové síly F byl vysvětlen výše. Jak bylo uvedeno, může být rozložena do vztlakové síly F_L a unášecí síly F_D . Síla F je tedy zodpovědná za F_L a F_D , ale nemůže způsobit žádnou rotaci úhlu φ .

Jednoduchý fyzikální model

Zbývá tedy jediná možnost, že za otáčení je zodpovědná rotační síla F_R . Ve zjednodušeném pohledu níže, bude zkoumán jen účinek této síly.

K vytvoření jednoduchého fyzikálního modelu je třeba použít točivý moment M a moment setrvačnosti J . Velikost momentu setrvačnosti závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení.



Obrázek 52 - Síla F_R , která způsobuje rotaci [01]

$$a) M = J * \ddot{\varphi}$$

$$b) 2 * F_R * r = 2 * m_M * r^2 * \ddot{\varphi}$$

$$c) \ddot{\varphi} = \frac{F_R}{m_M * r}$$

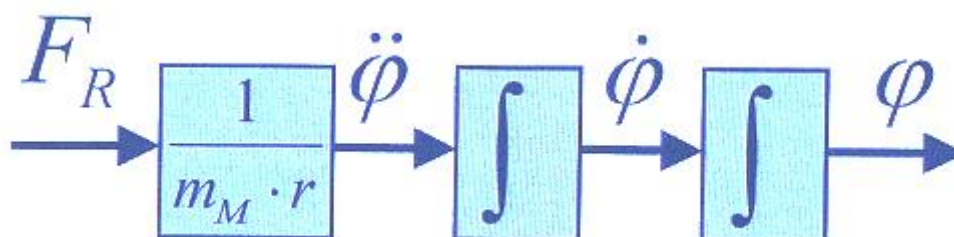
ad a) Vzorec říká, že točivý moment = moment setrvačnosti x úhlové zrychlení. Dva vztahy, $F = m * a$ a $M = J * \ddot{\varphi}$, jsou ve skutečnosti podobné. Zatímco $F = m * a$ je pro pohyb podél osy, tento se týká rotace kolem osy. Úhlové zrychlení $\ddot{\varphi}$ je druhá derivace úhlu φ .

ad b) Převod rovnice do proměnných, které jsou zobrazeny na obrázku; $M = 2 * F_R * r$ a $J = 2 * m_M * r^2$. Při výpočtu momentu setrvačnosti J se předpokládá, že celková hmotnost k ose je složena hlavně z hmotnosti dvou motorů m_M .

ad c) Vyjádření úhlové rychlosti $\dot{\varphi}$ (Rotační síla F_R působí na úhlové zrychlení $\ddot{\varphi}$).

Integrací úhlového zrychlení získáme úhlovou rychlost a integrací úhlové rychlosti úhel samotný. Aby tedy bylo možné vypočítat úhel φ , je nutné dvakrát integrovat úhlové zrychlení $\ddot{\varphi}$.

[Zdroj: 01]



Obrázek 53 - Jednoduchý fyzikální model jedné osy [01]

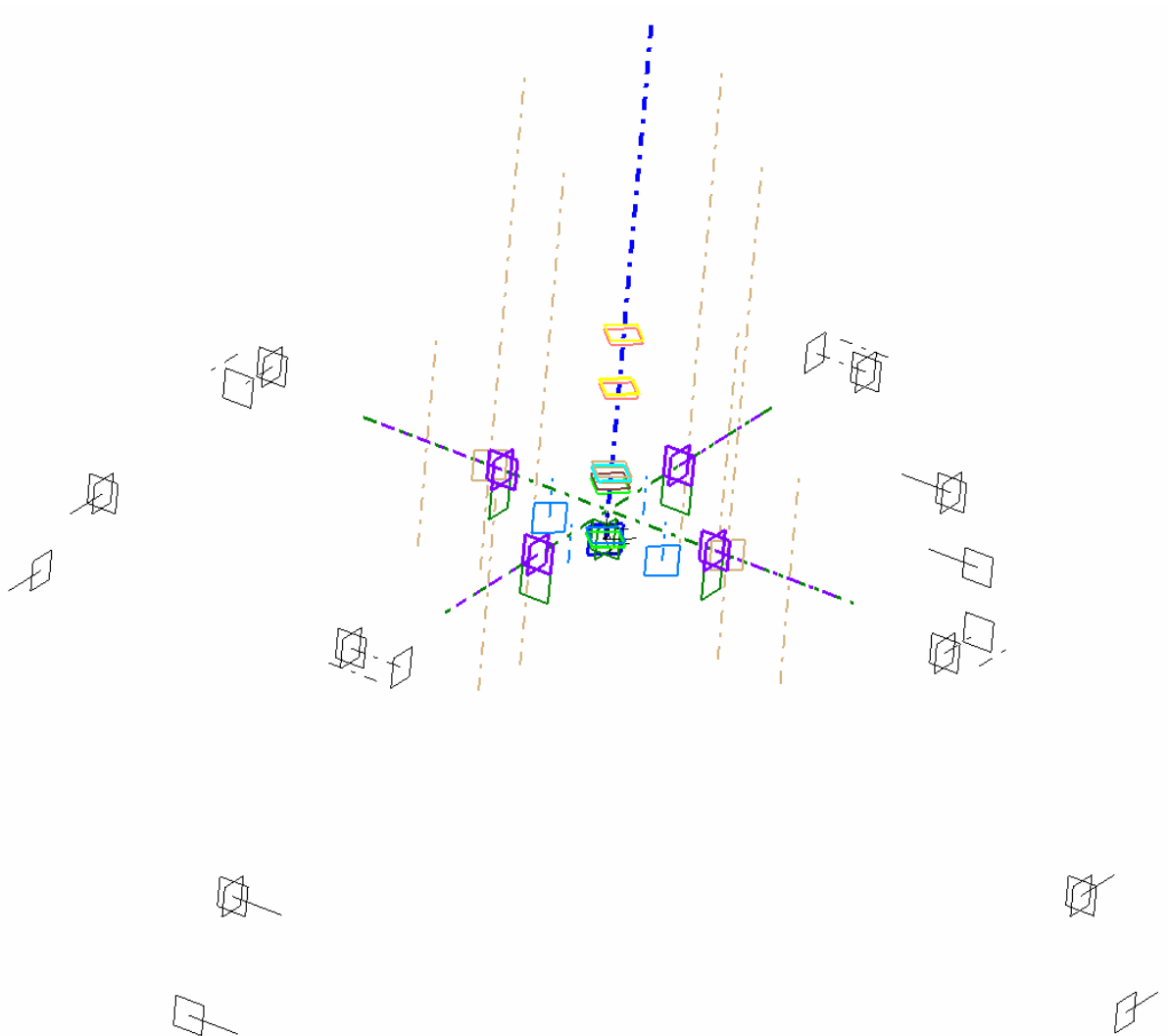
3 Návrh rámu

3D model kvadrikopty je navržen podle rámu zakoupeného univerzitou. Bude sloužit hlavně pro analýzu vlastních frekvencí systému a pro sledování změn jejich hodnot při změně hmotnosti systému. Příčinou změny hmotnosti je osazení modelu doplňkovými komponenty či nákladem.

Hlavním důvodem pro zjištění vlastních frekvencí je nastavení pracovních otáček motorů tak, abychom se pohybovali mimo tyto hodnoty a přechod přes vlastní frekvence byl rychlý.

3.1 3D model

Pro zhotovení 3D modelu je použit software Catia V5 a design je zkonstruován metodou skeletonu.

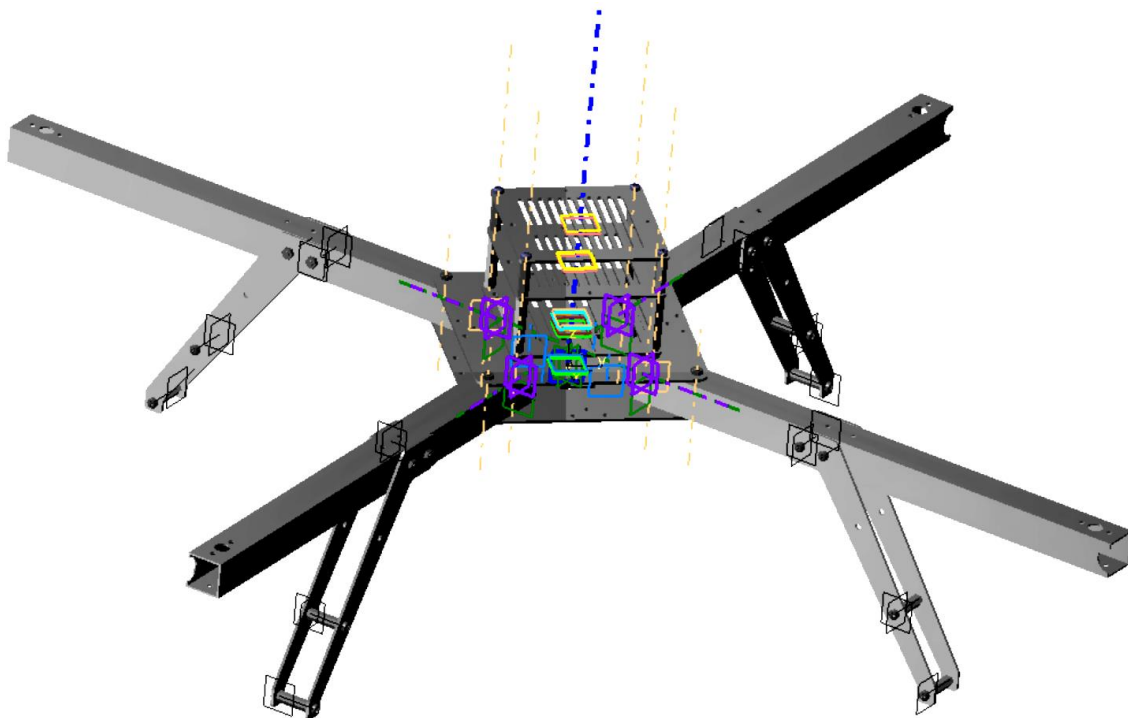


Obrázek 54 - Skeleton Kvadrikopty

Skeleton neboli kostra je soubor specifikací, který nese funkční charakteristiky celého modelu. Hlavní účel skeletonu je soustředit všechny klíčové informace na jednom místě. Jednou z největších výhod skeletonové konstrukce je možnost současné práce více uživatelů na jednom produktu. Uživatelé pracují nezávisle na jednotlivých modelech, které si nesou informace obsažené ve skeletonu. Současně je možné provádět změny ve skeletonu bez porušení konzistence celé sestavy. Po otevření sestavy si modely zjistí změněné specifikace a celá sestava se přizpůsobí změněnému skeletonu.

Přínosy při použití skeletonu jsou zejména tyto:

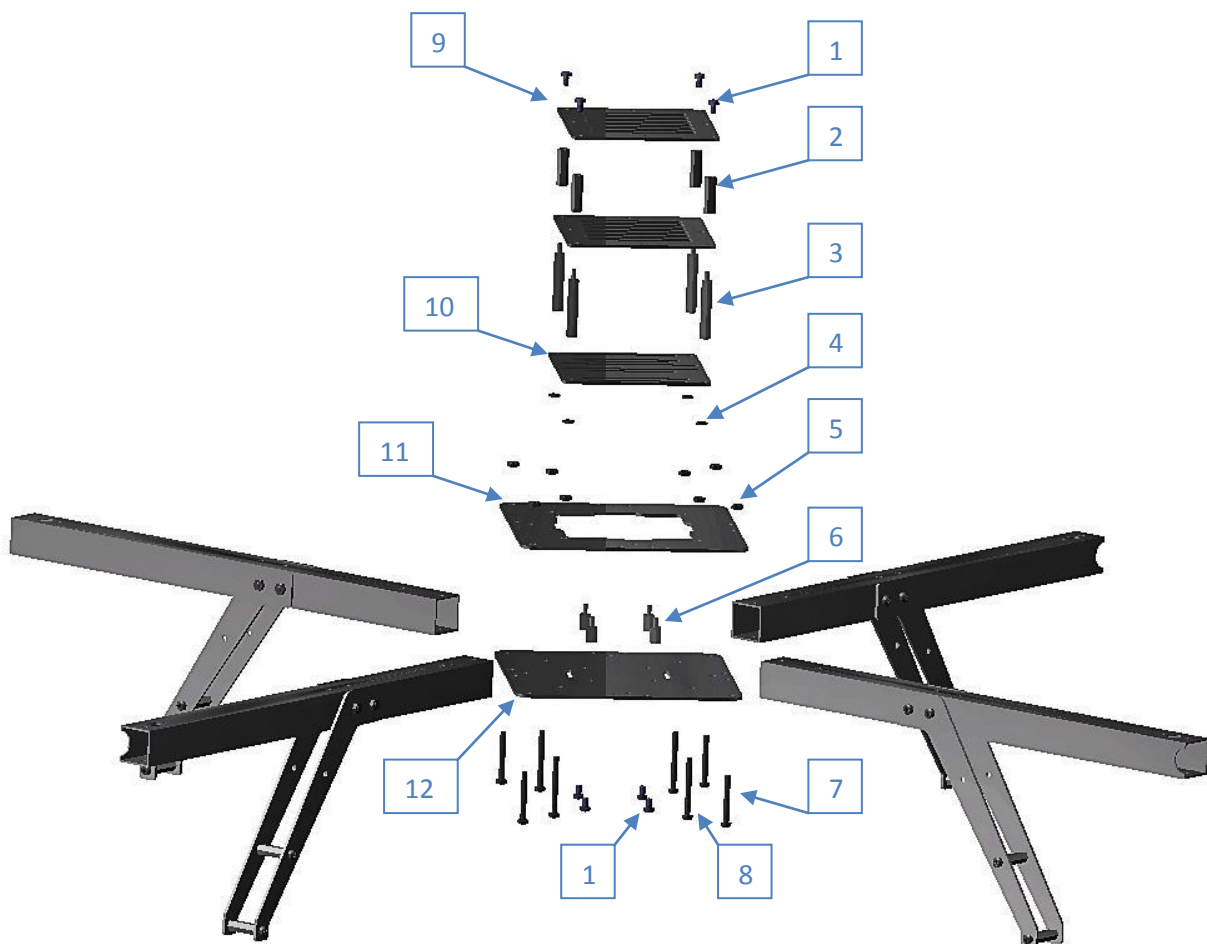
- Vytvořené sestavy a celky mohou být použity zcela nezávisle na ostatních produktech. Při změnách si často ušetříme načítání zcela nepotřebných dat
- Nevytváří se nežádoucí vazby mezi modely. Všechny modely jsou navázány pouze na skeleton
- Všechny informace se přenáší prostřednictvím produktové struktury
- Rychlejší změny na modelech a sestavách a jejich update



Obrázek 55 - Sestava kvadrikoptéry se skeletonem

V takto zkonstruované sestavě jsou skeletony představovány samostatnými party. Skeletony se v sestavách skrývají a nezahrnují se do kusovníku. Jednotlivé modely v sestavě jsou konstruovány v kontextu. To znamená, že modely mají externí linky – reference ze skeletonu. Kontexty lze libovolně měnit a tím určovat, v jaké úrovni sestavy si bude model hledat své externí reference. Tento princip má jednu velkou výhodu. V každé úrovni sestavy můžeme mít skeleton, který ponese nějaké specifikace a ty budou publikovány pokaždé se stejným

názvem. Při vkládání komponenty do libovolné sestavy si tak můžeme zvolit, v jakém kontextu má být model navázaný a vytvářet tak libovolné modifikace. V této sestavě kvadrikopty jsou použity dva skeletony. Jeden hlavní a druhý pro podsestavu profilu, který nese motor s vrtulemi, a přistávacích nožiček. Díky skeletonu je možné během několika vteřin změnit polohu přistávacích nožiček i jakýchkoliv ostatních partů, což napomáhá ke snadné změně rozložení hmotnosti. Dále je možné změnou jednoho parametru řídit tloušťky jednotlivých desek a rozměry čtvercových profilů, přičemž sestava se každé takové změně přizpůsobí po aktualizaci. Navíc, elace mezi geometrií ve skeletonu zajišťují zachování přesné polohy všech komponent. Tento skeleton byl vytvořen pouze pro konstrukci rámu. V případě potřeby není problém doplnit reference pro další komponenty a ty následně přidat do sestavy.[24]



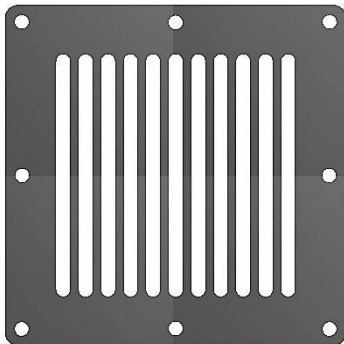
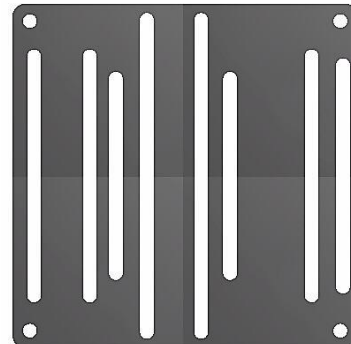
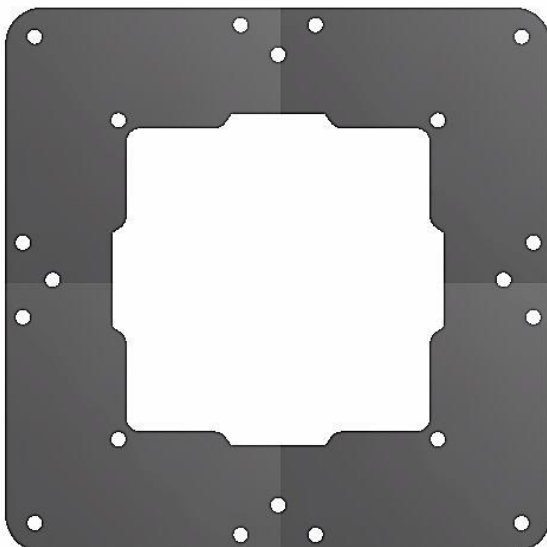
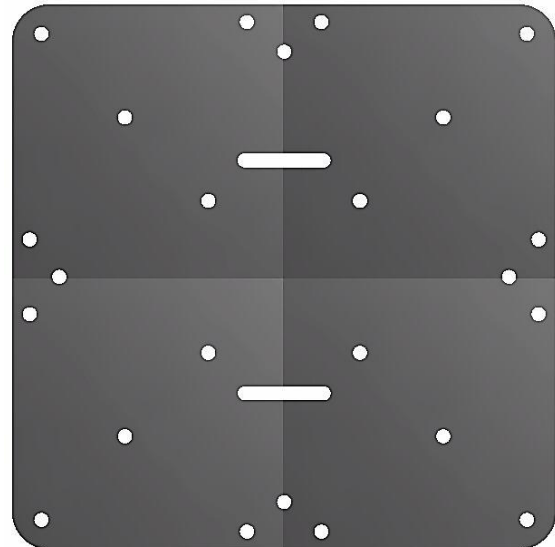
Obrázek 56 - Rozstřel sestavy

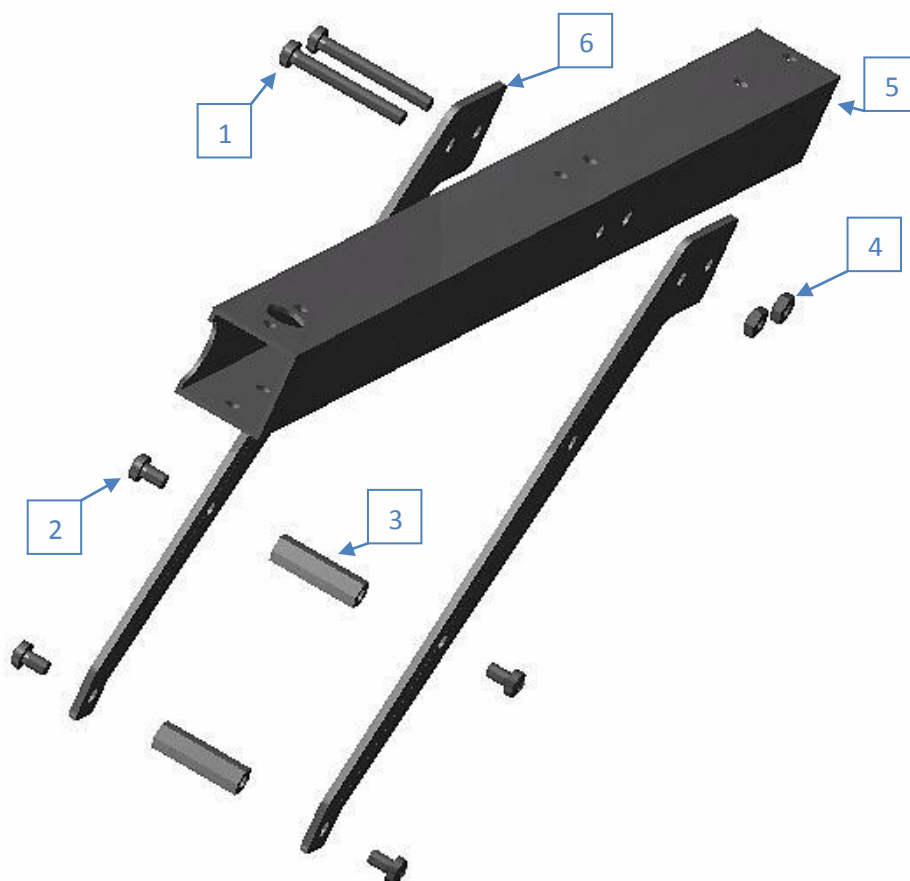
Přehled komponent sestavy:

1 – M3x5mm Plastic Screw (8x)

2 – M3x19mm Spacer (4x)



3 – M3x30mm Spacer (4x)**4 – M3 Rubber Washer (4x)****5 – M3 Metal Nut (8x)****6 – M3x08mm Spacer (4x)****7 – M3x25mm Screw (4x)****8 – M3x30mm Screw (4x)****9 – Stack-up plate (2x)****10 – APM Carrier plate****11 – Top plate****12 – Bottom plate**



Obrázek 57 - Rozstřel podsestavy

Přehled komponent podsestavy:

1 – M3x25 Screw (2x)



2 – M3x5mm Screw (4x)



3 – M3x19mm Spacer (2x)



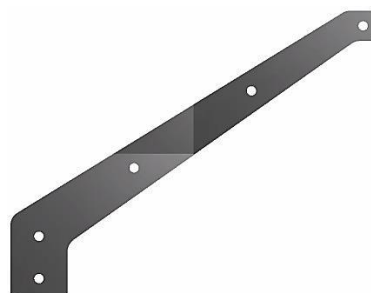
4 – M3 Metal Nut (2x)



5 – Arm



6 – Leg (2x)



3.2 Modální analýza

V této části práce se budeme věnovat modální analýze výše navrženého modelu v systému Ansys.

Modální analýza je analýza systému, při níž získáváme nebo ověřujeme teoretické modely a předpoklady. Při analýze je struktura nebo součást rozkmitána známými budícími účinky, často mimo své pracovní prostředí. Tento proces je podstatou modálních zkoušek. Modální zkouška jsou procesy aplikované na testované součásti s cílem získat matematický popis jejich dynamického chování.

Provedením modální zkoušky jsme schopni získat modální parametry systému a na tomto základě řešit mnohé problémy vyvolané strukturálními vibracemi. Problémy strukturálních vibrací představují významné riziko a omezení při návrhu širokého rozsahu strojírenských produktů. Mohou být příčinou porušení strukturální integrity, nebo mohou snižovat výkon strojního zařízení. Nadměrné vibrace vždy způsobují minimálně nadměrnou hlučnost a nepohodlí při provozu.

Skutečné struktury mají mnoho stupňů volnosti a pro jejich analýzu je zapotřebí mnoho rovnic. Proto je pro popis systému s více stupni volnosti ideální maticový zápis, který umožňuje množství rovnic zapsat jedinou maticovou rovnicí. Pro netlumený systém s více stupni volnosti n má vlastní pohybová rovnice v maticové formě tvar:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}$$

Kde:

$[M]$	-	matice hmotnosti; řád $n \times n$
$[K]$	-	matice tuhosti; řád $n \times n$
$\{x(t)\}$	-	vektor výchylek; řád $n \times 1$
$\{f(t)\}$	-	vektor budících sil; řád $n \times 1$

Pokud uvažujeme volné kmitání, položíme

$$\{f(t)\} = 0$$

V tomto případě můžeme předpokládat řešení ve tvaru:

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \qquad \{\ddot{x}(t)\} = -\omega^2\{X\}e^{i\omega t}$$

kde $\{X\}$ je vektor $n \times 1$ časově nezávislých amplitud. To předpokládá, že celý systém je schopen kmitat na jedné frekvenci ω .

Dosažením homogenního řešení do pohybové rovnice dostaneme:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{0\}$$

3.2.1 Výpočet vlastních frekvencí metodou konečných prvků

Určení vlastních frekvencí konečně prvkových modelů vede na řešení vlastních čísel. Při modální analýze volného kmitání v Ansysu jsou vlastní frekvence ω_i a vlastní tvary Φ_i soustavy vypočteny z rovnice:

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\Phi_i\} = 0$$

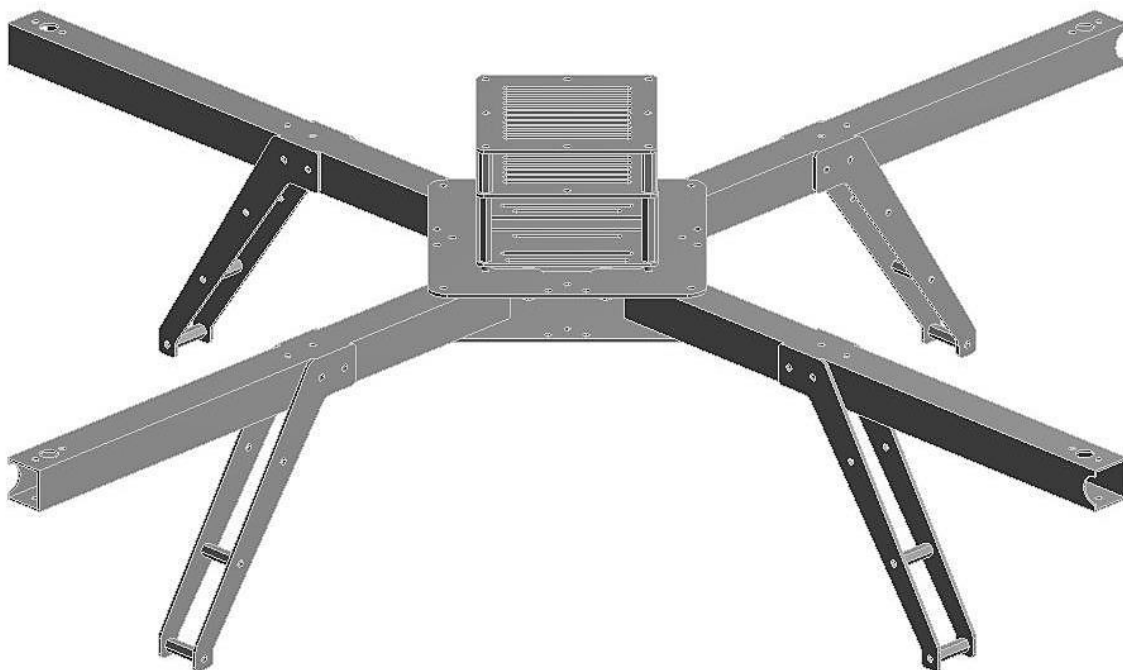
Předpoklady:

- $[K]$ a $[M]$ jsou konstantní
 - je předpokládáno lineární elastické chování materiálu
 - použití teorie malých deformací, žádné nelinearity
 - $[C]$ není zahrnuto v rovnici, takže žádné tlumení
 - $\{f\}$ není zahrnuto v rovnici, model není buzený
 - model obsahuje vazby nebo je bez vazeb
- Vlastní tvary $\{\Phi\}$ jsou relativní hodnoty

[Zdroj: 26]

3.2.2 Výpočetní model rámu

Pro výpočetní model je použit model kvadrikopty vytvořený v softwaru Catia. Tento model je převeden do programu Ansys a zjednodušen. Rovnice modální analýzy nám charakterizuje rozložení hmoty a tuhosti v systému. Proto je možné některé komponenty s malou hmotností, která výrazně neovlivní výsledky, zanedbat. V případě rámu se jedná o malé komponenty – šrouby, matice, podložky. Delší šrouby, které spojují jednotlivé části, jsou nahrazeny prvkem Beam, pro který je zvolen stejný materiál, jako pro šroub.



Obrázek 58 - Výpočetní model

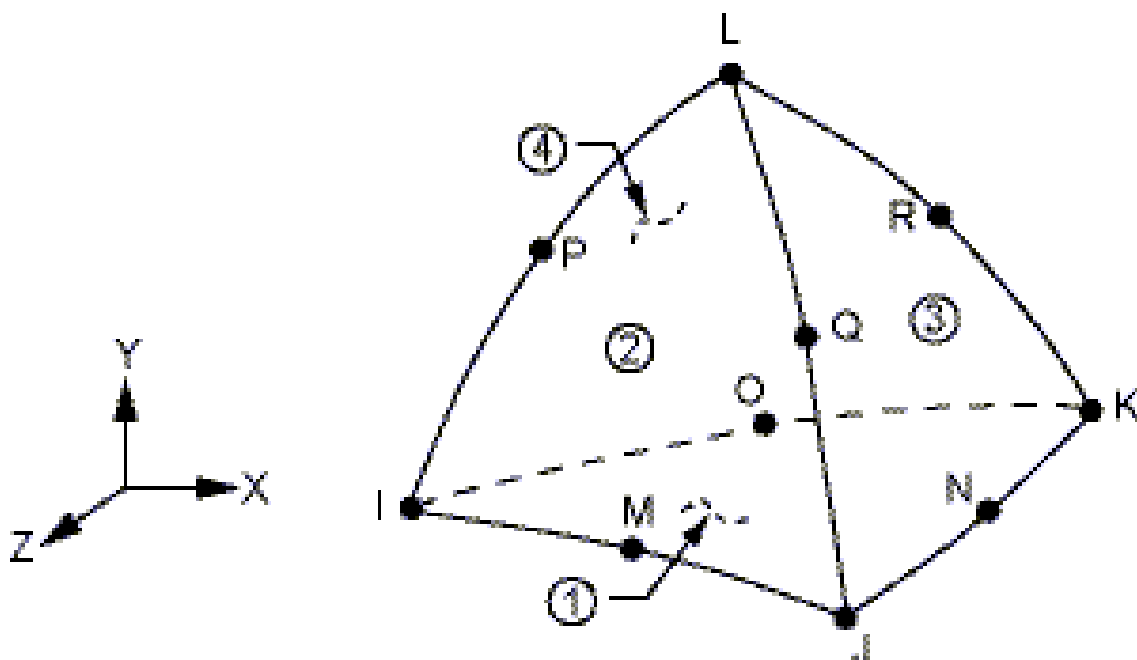
	Density	Young's Modulus	Poisson's Ratio
Steel	7 850 kg*m ⁻³	200 000 MPa	0,3
Aluminium alloy	2 770 kg*m ⁻³	71 000 MPa	0,33

Tabulka 5 - Tabulka použitých materiálů

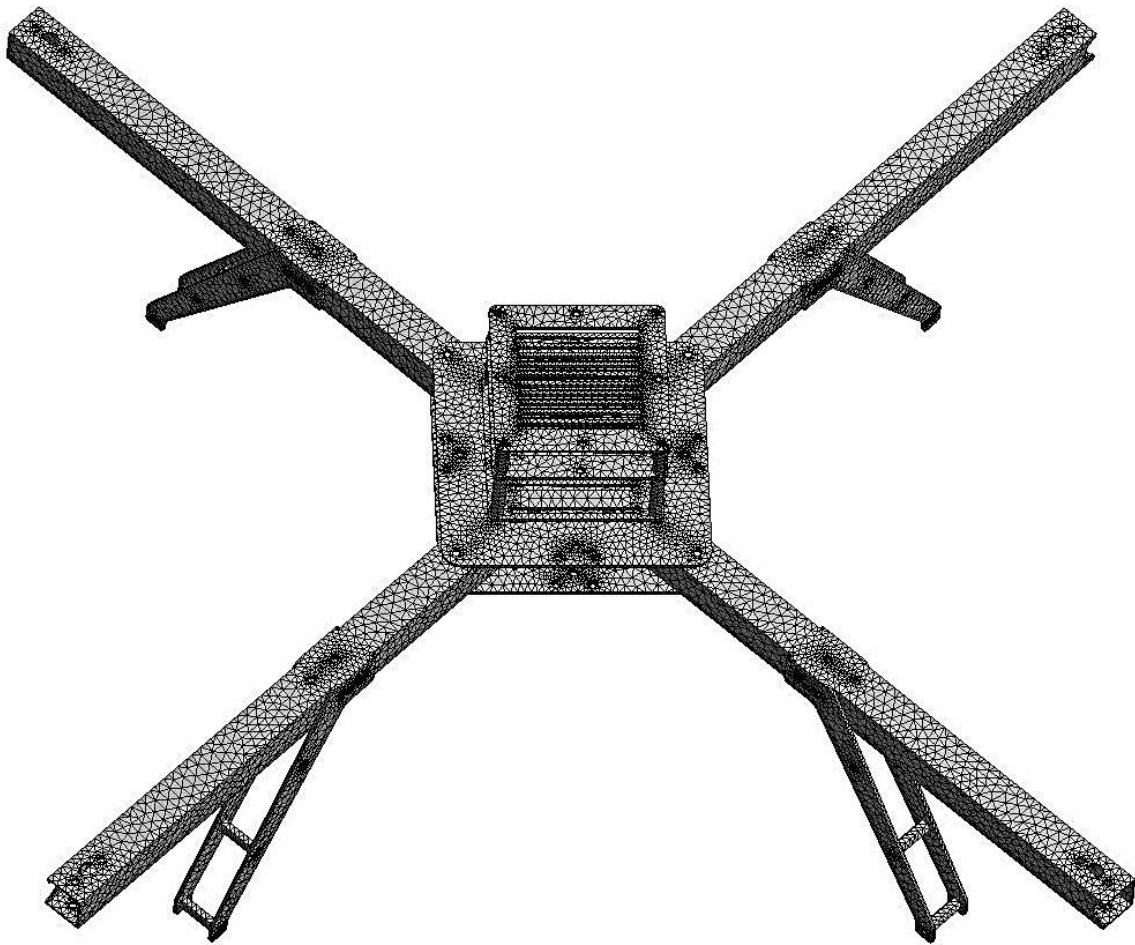
Pro modální analýzu je materiál považovaný za homogenní a izotropní, bez materiálových nelinearit. Tabulka 5 obsahuje všechny materiály použité v této analýze.

3.2.3 Vytvoření sítě

Pro vytvoření sítě konečných prvků na výpočtovém modelu používám automaticky generovanou síť prvků. Pro každé těleso je vygenerována síť pomocí prostorového prvku SOLID. Pro každé těleso je vytvořena pravidelná a řídká síť prvků. Vzhledem k složitějšímu tvaru některých těles je zvolen pro všechny tělesa prostorový element SOLID187, vysoce uspořádaný, deseti uzlový čtyřstěn neboli tetraedr. Síť je definována velikostí hrany prvku. Změna velikosti hrany prvku nemá velký vliv na vypočtené vlastní frekvence, ale postupným zhušťováním sítě se zvyšují nároky na výpočetní systém a prodlužuje se čas výpočtu. Pro tuto úlohu byla zvolena velikost hrany prvku 3,0 mm.



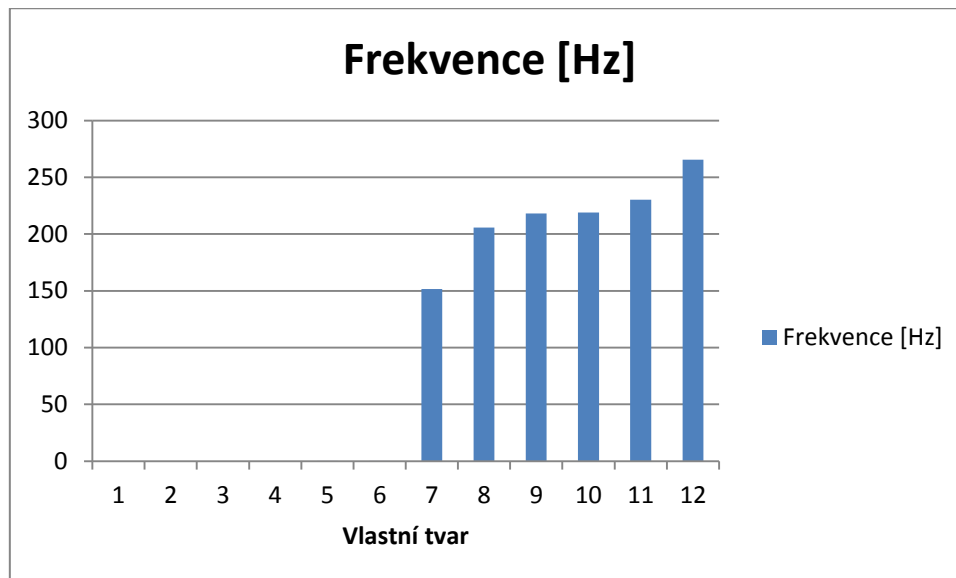
Obrázek 59 - Prostorový prvek SOLID187[26]



Obrázek 60 - Síť konečných prvků výpočtového modelu

3.2.4 Modální analýza rámu

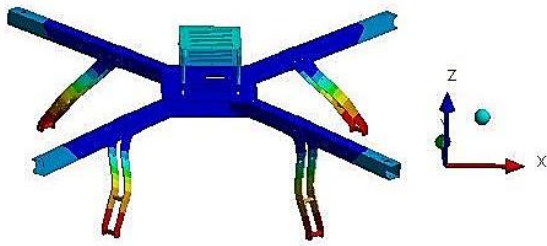
Pro řešení modální analýzy v systému Ansys je použita metoda PCG Lanczos. Tato metoda, stejně jako metoda Block Lanczos, je iterační. Metoda Block Lanczos je používána pro velké modely a nalezení více tvarů vlastních čísel. Ve srovnání s metodou PCG Lanczos pracuje rychleji. Metoda PCG Lanczos je vhodná pro nalezení menšího počtu vlastních tvarů a je stabilní pro modální analýzy s hodně stupni volnosti.



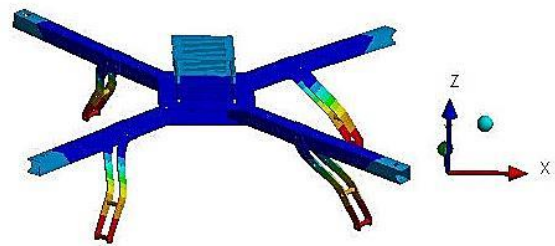
Obrázek 61 - Sloupcový graf s vlastními frekvencemi rámu

Jak je patrné z grafu na obrázku 61, prvních šest vlastních tvarů kmitu je hodnota frekvence nulová nebo se k nule blíží. To odpovídá našemu případu, kdy je model kvadrikopty řešen bez okrajových podmínek a tedy se šesti stupni volnosti, kde prvních šest tvarů je rovno nule. To odpovídá třem rotacím a třem posuvům volného tuhého tělesa v prostoru.

Dále v grafu vidíme, že u devátého a desátého vlastního tvaru kmitu mají vlastní frekvence téměř stejné hodnoty. Vlastní frekvence, jejichž hodnoty jsou takto blízko sebe, ukazují na to, že charakteristické vlastní tvary mohou být podobné nebo dokonce i stejné, ale vzhledem ke geometrické symetrii modelu se vyskytují každý v jiném směru. Na následujících obrázcích jsou tyto vlastní frekvence a jim odpovídají vlastní tvary zobrazeny včetně souřadného systému, aby bylo možné vidět směr, ve kterém se charakteristický vlastní tvar vyskytuje.



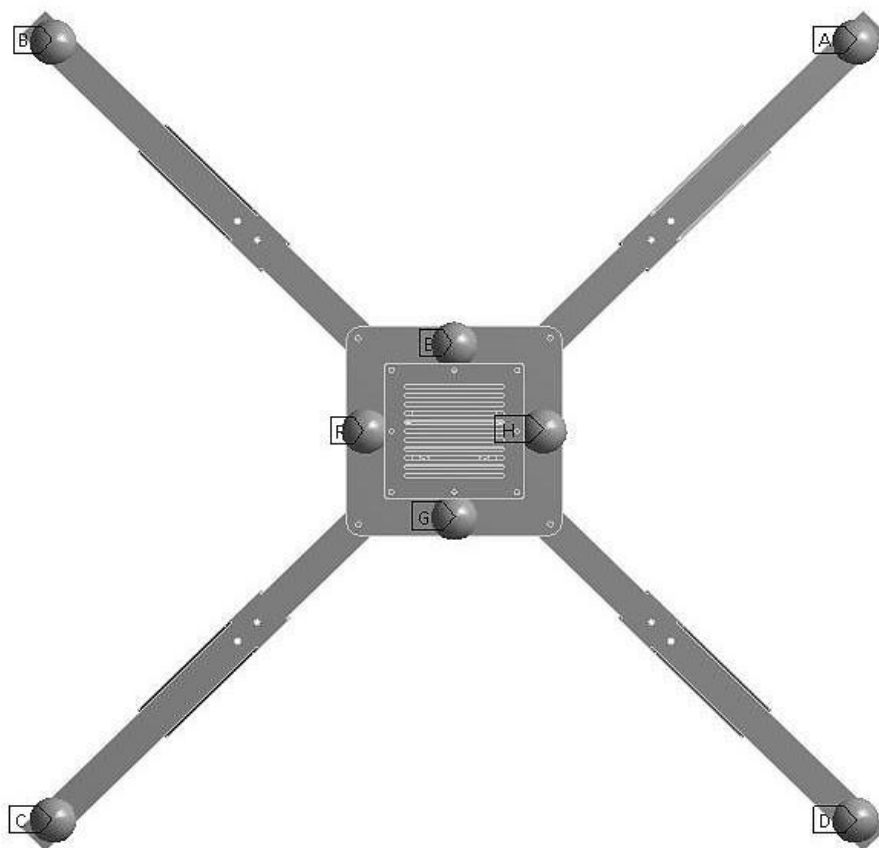
Obrázek 62 - Tvar devátého kmitu



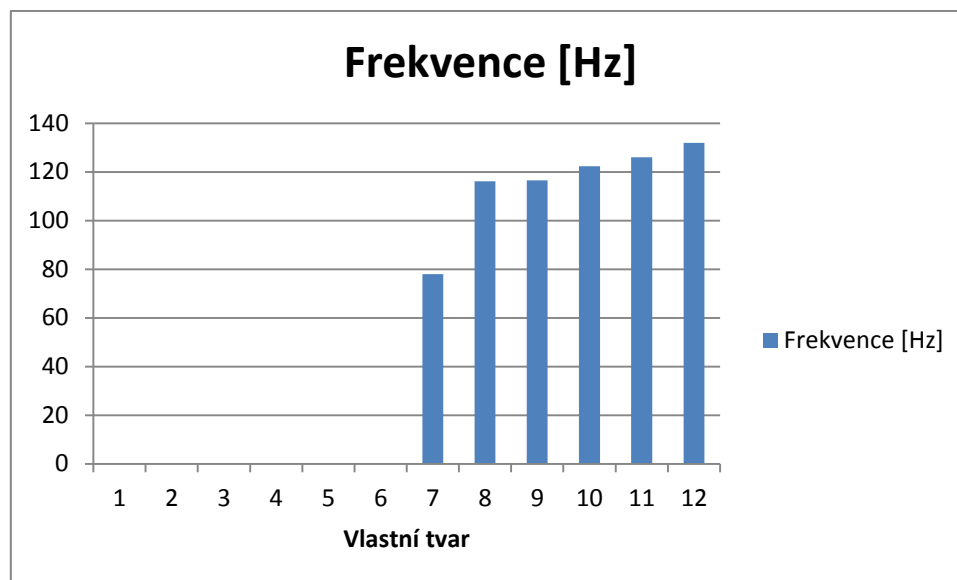
Obrázek 63 - Tvar desátého kmitu

3.2.5 Modální analýza rámu s hlavními komponenty

V tomto případě je výpočetní model namodelován včetně hlavních komponent. Je zde použitý výše navržený matematický model, na kterém je namodelováno několik hmotných bodů. Tyto hmotné body nám nahrazují hlavní komponenty, jejichž hmotnost je nezanedbatelná a má vliv na hodnotu vlastních frekvencí. Jedná se především o hmotnost motoru s vrtulí (73,5g) a baterie (407g). Ostatní komponenty, které mají v porovnání s nimi nízkou hmotnost, jsou pro výpočet této modální analýzy zanedbány.

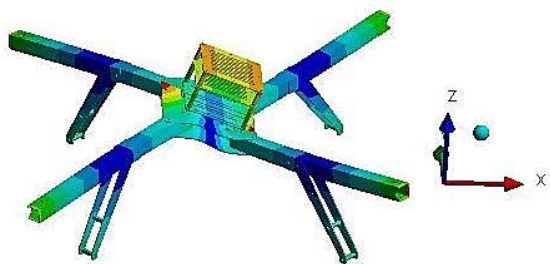


Obrázek 64 – Výpočtový model s hmotnými body

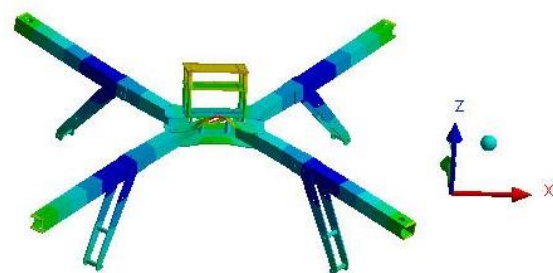


Obrázek 65 - Sloupcový graf s vlastními frekvencemi rámu s hmotnými body

V grafu na obrázku 65 je opět vidět, že prvních šest vlastních frekvencí je nulových a osmý a devátý tvar jsou opět frekvence o téměř stejných hodnotách.



Obrázek 66 – Tvar osmého kmitu



Obrázek 67 - Tvar devátého kmitu

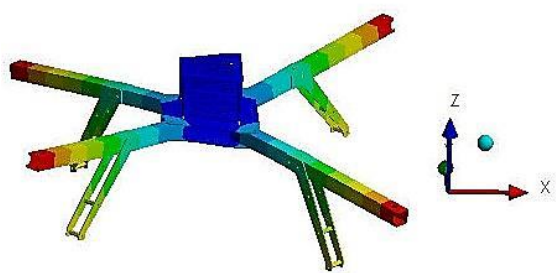
3.2.6 Porovnání výsledků

Tvar	Frekvence [Hz]	
	rám	rám s hmotou
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	7,06E-03	0
6	2,08E-02	0
7	151,62	77,908
8	205,78	116,09
9	218,02	116,53
10	218,92	122,28
11	230,29	125,94
12	265,59	131,91
13	-	131,97
14	-	151,43
15	-	208,5
16	-	223,73
17	-	223,76
18	-	226,88
19	-	265,11
20	-	286,55

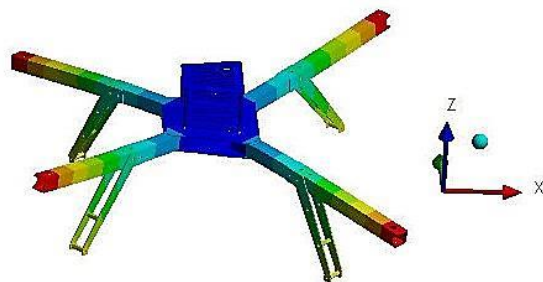
Tabulka 6 - Srovnání frekvencí pro jednotlivé tvary kmitů

Výsledkem modální analýzy jsou vlastní frekvence a pro ně charakteristické vlastní tvary kmitu k jednotlivým řešeným modelům. Jedním z hlavních vlivů na kmitání soustavy jsou otáčky motorů. Naším úkolem je tedy zjistit, zda se nepohybujeme s provozními otáčkami motoru v nebezpečných oblastech.

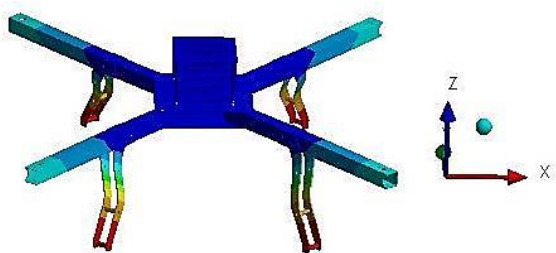
Jednoduchým výpočtem, který byl zmíněn dříve v kapitole Avionika, zjistíme podle charakteristik a parametrů jednotlivých komponent, že maximální otáčky motoru bez vrtule jsou 9 435 otáček za minutu, což je 157,25 Hz. V tabulce 6 vidíme, že první vlastní frekvence je 77,908 Hz. Tato frekvence je nízká a pro náš systém při provozních otáčkách není nebezpečná.



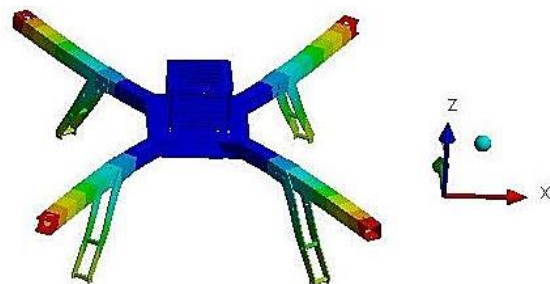
Obrázek 68 - 7. tvar - rám



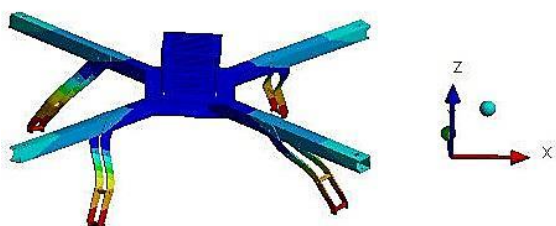
Obrázek 69 - 7. tvar - rám s hmotou



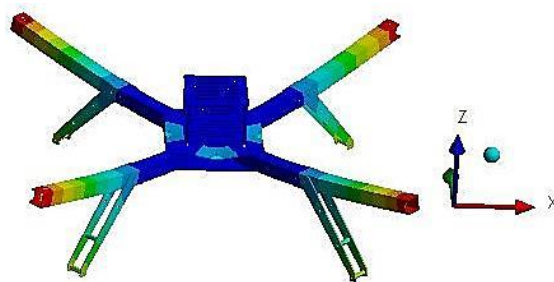
Obrázek 70 - 8. tvar - rám



Obrázek 73 - 10. tvar - rám s hmotou



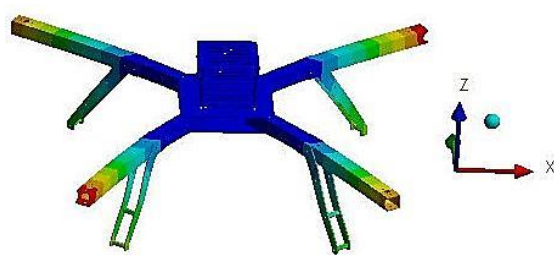
Obrázek 71 - 11. tvar - rám



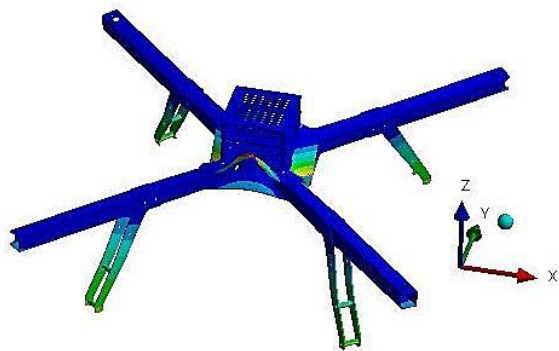
Obrázek 74 - 11. tvar - rám s hmotou



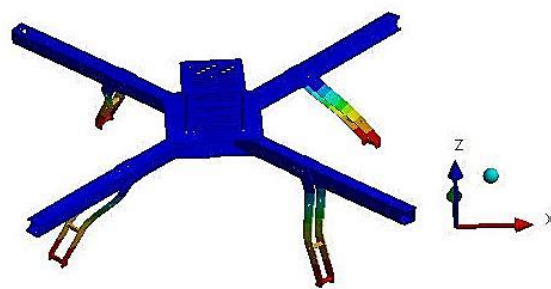
Obrázek 72 - 12. tvar - rám



Obrázek 75 - 12. tvar - rám s hmotou



Obrázek 76 - 14. tvar - rám s hmotou



Obrázek 77- 15. tvar - rám s hmotou

Dále je v této tabulce vidět, že je zde nebezpečná oblast frekvencí, která odpovídá vlastním tvarům kmitů od osmého až po třináctý. Jsou to frekvence, které se pohybují v rozsahu hodnot 116,09 – 131,91 Hz. Tomuto rozsahu frekvencí odpovídají otáčky motoru zhruba od 7 000 do 8 000. Jelikož je to oblast, ve kterém se vyskytuje hodně vlastních frekvencí, musíme být v tomto rozsahu otáček motoru velice opatrní a nejlépe toto pásmo přejít co nejrychleji a dále se mu pokud možno vyhýbat.

V tabulce si také můžeme všimnout, že čtrnáctý tvar, jehož vlastní frekvence je 151,43 Hz, se pohybuje v oblasti maximálních otáček motoru.

Pokud se ale podíváme na obrázek 76, který odpovídá frekvenci 151,43 Hz, je zřejmé, že tato frekvence namáhá hlavně horní desku rámu, na které jsou umístěny baterie. Pokud se podíváme pozorněji, vidíme, že k namáhání dochází právě v místech, kde uvažujeme hmotné body, které nahrazují baterie. Hmoty je soustředěna do jednoho bodu a je tedy možné, že pokud by se tato hmotnost rozložila do plochy, tato frekvence se změní. Další možností je vyztužit desku přidáním nějakého žebra, které by změnilo rozložení hmotnosti nebo přesunutí hmotných bodů na jiné místo a sledovat, jaký vliv budou mít tyto změny na vlastní frekvence. Toto už ale není cílem této práce.

V této části práce jsme získali výpočtový model kvadrikopty, který lze dále využívat pro další výpočty, jako je například vliv navrhnutého držáku na kameru a jeho způsob uchycení k rámu. Ale to už bylo nad rámec této bakalářské práce.

4 Závěr

Tato bakalářská práce zahrnuje rešerši autonomních létajících vozidel od historie až po současné využití bezpilotních prostředků jak ve vojenských aplikacích, tak i v civilních oblastech. Jsou zde uvedeny jedny z nejvýznamnějších modelů z každé oblasti se stručným popisem. V nejbližší budoucnosti lze očekávat rozsáhlé nasazování bezpilotních prostředků a to hlavně ve vojenských aplikacích, při získávání dat pro vědecké účely a k monitorování oblastí.

V druhé části, která se zabývá konstrukcí kvadrikopty, jsou uvedeny dnes nejpoužívanější a nejoblíbenější open source projekty se základním popisem a obrázkem pracovní stanice, kterou lze modely ovládat. Na open source projekty navazuje kapitola o avionice kvadrikopty. Tato část práce nás seznamuje se základními komponenty kvadrikopty a je zde popsán základní princip jejich činnosti a způsob navrhování. V závěru kapitoly je uvedena mechanika létání.

Závěrečnou částí práce je návrh konstrukce rámu kvadrikopty a modální analýza tohoto rámu. Z výsledku modální analýzy máme přehled o vlastních frekvencích, které lze porovnávat se zdroji kmitání soustavy. V našem případě byl jako jeden z hlavních vlivů na kmitání sestavy zvolen motor kvadrikopty. Bylo zjištěno, jaké otáčky motoru jsou nebezpečné, a je dobré se jim vyhýbat, nebo jakým způsobem lze upravit rám.

5 Použitá literatura

Knižní zdroje:

[01] Büchi, R. *Fascination quadcopter*. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2011

Internet:

[1] <http://propaganda-dimitrios.blogspot.cz/2011/01/archytas-of-tarentum-worlds-first-model.html> [cit. 2013-09-28]

[2] <http://21stoleti.cz/blog/2008/01/18/od-letajiciho-kola-az-do-vesmiru/> [cit. 2013-09-28]

[3] <http://terpconnect.umd.edu/~leishman/Aero/history.html> [cit. 2013-09-28]

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles [cit. 2013-09-29]

[5] David Schwarz, *VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH LÉTAJÍCÍCH PROSTŘEDKŮ PRO TELEMETRICKÉ ÚČELY*
pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Schwarz.pdf [cit. 2013-06-08]

[6] <http://www.hybrid.cz/tagy/bezpilotni-letadla> [cit. 2013-09-29]

[7] <http://www.navalhistory.org/> [cit. 2013-10-05]

[8] <http://www.army-technology.com/features/featureuav-evolution-natural-selection-drone-revolution> [cit. 2013-10-05]

[9] <http://www.militarybox.cz/news/general-atomics-mq-9-reaper-bezpilotni-bitevnik/>
[cit. 2013-10-05]

[10] <http://www.letectvi.cz/letectvi/Article67477.html> [cit. 2013-10-05]

[11] <http://veda-technika.blogspot.cz/2009/07/bezpilotni-pruzkumne-letouny-1.html>
[cit. 2013-10-05]

[12] <http://veda-technika.blogspot.cz/2009/08/bezpilotni-pruzkumne-letouny-2.html>
[cit. 2013-10-06]

[13] <http://www.nasa.gov/centers/dryden/research/GloPac/> [cit. 2013-10-06]

[14] <http://english.sina.com/technology/p/2011/0506/372252.html> [cit. 2013-10-06]

[15] <http://www.caa.cz/> [cit. 2013-10-26]

[16] <http://rmax.yamaha-motor.com.au/> [cit. 2013-10-26]

[17] <http://www.gizmag.com/go/2440/> [cit. 2013-10-26]

[18] <http://ruslet.webnode.cz/technika/ruska-technika/bezpilotni-prostredky/n-i-kamov/ka-37/>
[cit. 2013-10-26]

[19] <http://www.armedforces-int.com> [cit. 2013-11-23]

- [20] www.parrot-ardrone.cz [cit. 2013-11-23]
- [21] <http://www.arducopter.co.uk/> [cit. 2013-11-23]
- [22] <http://www.draganfly.com/> [cit. 2013-11-23]
- [23] IEEE Robotics & Automation magazine - Vol.19, No.3 September 2012
<http://www.ieee-ras.org/ram> [cit. 2013-12-07]
- [24] <http://www.catia-forum.cz> [cit. 2014-03-15]
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle [cit. 2013-09-29]
- [26] <http://www.ansys.com> [cit. 2014-04-05]
- [27] <https://cs.wikipedia.org/wiki/UAV> [cit. 2013-09-28]
- [28] http://archive.wired.com/science/discoveries/multimedia/2007/11/gallery_helicopter?slide=4&slideView=5 [obr. 3]
- [29] <http://www.shelleys.demon.co.uk/faug03.htm> [obr. 7]
- [30] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:MQ-9_Reaper,_Creech_Air_Force_Base_-_080619-F-2907C-012.jpg [obr. 9]
- [31] [http://aircraft.wikia.com/wiki/File:800px-RQ-1_Predator_\(drawing\).png](http://aircraft.wikia.com/wiki/File:800px-RQ-1_Predator_(drawing).png) [obr. 8]
- [32] <http://www.asiandefencenews.com/2012/05/us-air-force-general-atomics-predator.html>
[obr. 10]
- [33] <http://www.northropgrumman.com> [obr. 12]
- [34] <http://www.unmanned.co.uk/unmanned-vehicles-news/unmanned-aerial-vehicles-uav-news/fire-scout-uav-achieves-endurance-record/> [obr. 14]
- [35] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Geschaefit-mit-ueberwachungs-Flugdrohnen-boomt-178765.html> [obr. 25]
- [36] <http://www.flightglobal.com/> [obr. 11]