



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Karel Ryšavý

Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky

Bakalářská práce

2019



K621..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Karel Ryšavý

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

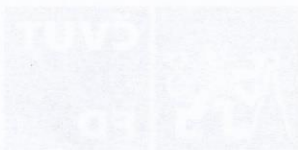
Název tématu (česky): **Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky**

Název tématu (anglicky): Anti-Collision System for Unmanned Aerial Vehicles

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Vymezení pojmů bezpilotní prostředek a antikolizní systém
- Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní prostředky v zahraničí a ČR
- Návrh požadavků na antikolizní systém pro zvolenou kategorii bezpilotních prostředků
- Porovnání současně dostupných zařízení
- Implementace zařízení na konkrétní typ bezpilotního prostředku



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: BEHAR, M. Drones in a Busy Sky: Can technology protect airplanes from the new threat?. Air & Space Magazine. 2016.
HOLCOMBE, R. G. Integrating Drones into the US Air Traffic Control System. Arlington, VA, 2016.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Hůlek**

Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Karel Ryšavý
jméno a podpis studenta

V Praze dne 3. prosince 2018

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zejména děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Davidu Hůlkovi, Ph.D., za odborné a trpělivé vedení při tvoření bakalářské práce a dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Saskovi, Dr. rer. nat. za poskytnutí mnoha důležitých interních informací a materiálů.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a kamarádům z oddílu za pevnou a stále trvajícím morální podporu po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Čestně prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 26. srpna 2019

.....

podpis

Obsah

Abstrakt.....	7
Abstract.....	7
Klíčová slova	7
Keywords.....	7
Použité zkratky	8
Úvod	10
1. Vymezení pojmů	12
1.1. Antikolizní systém	12
1.2. Bezpilotní systém	14
2. Klasifikace UAS	15
2.1. ČR – Doplněk X	15
2.1.1. Provoz UAS ve vzdušných prostorech	16
2.2. EASA	19
2.2.1. Kategorie ‚open‘	20
2.2.2. Kategorie ‚specific‘	22
2.2.3. Kategorie ‚certified‘	22
2.3. Srovnání	23
3. Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní systémy v zahraničí a ČR	24
3.1. Evropa: U-Space	24
3.2. Spojené státy: NASA FAA UTM.....	26
3.2.1. Vývojová stadia	27
3.2.2. Technologie a testování	28
3.3. UTM v ČR.....	29
3.4. Evropa: MIDCAS	30
3.4.1. Technologie a testování	30
3.4.2. Princip fungování	33
3.5. Spojené státy: NASA UAS-NAS	34
4. Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT	35
4.1. Soutěžní konfigurace při MBZIRC 2017	36
4.1.1. Přehled použitého hardwaru	36
4.1.2. Pravidla pohybu bezpilotních systémů při soutěži.....	37
4.2. Rychlá vzájemná relativní lokalizace bezpilotních systémů za použití LED značek.....	39
4.2.1. Motivace pro vývoj systému	39

4.2.2.	Fungování systému.....	39
4.2.3.	Výhody a nevýhody detekce UV LED značek.....	40
5.	Návrh požadavků na antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAV.....	41
5.1.	Úvod a specifikace testovacích bezpilotních systémů	41
5.2.	Koncept antikolizního systému	42
5.2.1.	Kooperativní detekce letadel s posádkou	42
5.2.2.	Detekce překážek a neidentifikovatelných letadel	43
5.3.	Implementace antikolizního modulu na ústavní UAS	45
5.3.1.	Align T-REX 500 Pro.....	45
5.3.1.1.	ADS-B.....	46
5.3.1.2.	LiDAR	46
5.3.1.3.	Relativní vizuální lokalizace	46
5.3.1.4.	Palubní počítač.....	47
5.3.1.5.	Laserový měřič	47
5.3.1.6.	Pixhawk 4 autopilot.....	48
5.3.2.	LAheli LA 700.....	49
5.3.2.1.	ADS-B.....	49
5.3.2.2.	LiDAR	49
5.3.2.3.	Palubní počítač.....	50
5.3.2.4.	Pixhawk 4 autopilot.....	50
5.3.3.	DJI Phantom 4	51
5.3.3.1.	ADS-B.....	51
5.3.3.2.	LiDAR	51
5.4.	Diskuse a závěr	52
	Seznam literatury.....	53

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce „Antikolizní systém pro bezpilotní prostředky“ je nejprve klasifikovat diversifikované portfolio bezpilotních systémů dle aktuálního legislativního rámce. Následně analyzovat probíhající programy zabývající se problematikou integrace bezpilotních systémů do sdíleného vzdušného prostoru na evropské úrovni, ve Spojených státech amerických i v České republice a na základě této analýzy navrhnout hardwarový koncept spolehlivého, kompatibilního a modulárního antikolizního systému pro většinu bezpilotních systémů.

Abstract

The subject of this bachelor thesis “Anti-Collision System for Unmanned Aerial Vehicles” is firstly to classify the diversified portfolio of UAVs according to current legislative framework. Subsequently to analyze ongoing programmes that address the challenge of integrating UAVs into shared airspace on European level, in the United States as well as in the Czech Republic and on the basis of such analysis design a hardware concept of a reliable, compatible and modular detect and avoid system for the majority of UAVs.

Klíčová slova

Antikolizní systém, detect and avoid, bezpilotní systém, UAS, UAV, UTM, EASA

Keywords

Anticollision system, detect and avoid, unmanned aerial vehicle, UAS, UAV, UTM, EASA

Použité zkratky

Tabulka 1 - seznam použitých zkratek

ACAS	Airborne Collision Avoidance System	
AFIS	aerodrome flight information service	letištní informační služba
ATM	Air Traffic Management	
ATZ	aerodrome traffic zone	
BVLOS	beyond visual line of sight	za hranicí vizuálního dohledu pilota
CNS	communication, navigation, surveillance	
CTR	controlled traffic region	
EDA	European Defence Agency	
FAA	Federal Aviation Administration	
FOV	field of view	zorné pole
fps	frames per second	snímky za sekundu
FSM	Finite-state Machine	konečný automat
GA	General Aviation	všeobecné letectví
GNSS	Global Navigation Satellite System	
GPS	Global Positioning System	
IFF	Identification friend or foe	
IMU	Inertial Measurement Unit	inerční měřicí jednotka
INS	Inertial Navigation System	inerční navigační jednotka
IR	infrared	infračervené
LED	light-emmiting diode	světelná dioda
LiDAR	Light Detection and Ranging	
MAV	micro aerial vehicles	
MBZIRC	Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge	
MIDCAS	Mid Air Collision Avoidance System	
MRS	Multi-robot Systems	
MTOW; MGTOW	Maximum takeoff weight; Maximum gross takeoff weight	maximální vzletová hmotnost
NextGen	Next Generation Air Transportation System	

NUC	Next Unit of Computing	
RA	resolution advisory	
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	
RTK	Real Time Kinematic	
S & A; D & A	Sense and Avoid; Detect and Avoid	
SESAR	Single European Sky ATM Research	projekt jednotného evropského nebe
SSR	secondary surveillance radar	sekundární přehledový radar
TA	traffic advisory	
TCAS	Traffic Collision Avoidance System	
TCL	technology capability levels	
UAS-NAS	Unmanned Aircraft Systems Integration in the National Airspace System	
UAV; UAS	Unmanned Aerial Vehicles; Unmanned aerial system	
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management	
UV	ultraviolet	ultrafialové
VLL	very low level	velmi nízká hladina
VLOS	visual line of sight	vizuální dohled pilota

Úvod

Touha létat je stará jako samotné lidstvo. Od prvního zdárného motorem poháněného letu bratrů Wrightových uběhlo jen 116 let a za tuto krátkou dobu urazilo letectví obrovský kus cesty. Světové války přinesly prudký rozvoj technologií v letectví a v poválečných letech se létání postupně stalo běžnou součástí civilního života v moderním světě. S prudkým rozvojem docházelo ke zhuštění letového provozu a po prvních tragických vzdušných srážkách v 50. letech vyvstala potřeba antikolizního systému, který by umožnil bezpečný růst letecké dopravy.

Základní rozdělení a definice antikolizního systému rozebírám v kapitole 1 – Vymezení pojmů.

Systém TCAS, tak jak jej známe dnes, má kořeny v polovině 70. let ve Spojených státech. Růst životní úrovně na celém světě znamenal další skokový nárůst poptávky po letecké dopravě. Odpovědí na tuto poptávku je stále trvajícím rozvojem leteckého průmyslu a technologií, podpořených nárůstem výpočetního výkonu.

Technologie umožnily vynález bezpilotních strojů, které se staly novou a velmi účinnou zbraní moderních armád. První drony sloužily na konci 90. let k vojenským účelům. V posledním desetiletí se tyto technologie dostaly i do civilního sektoru, zejména do oblasti logistiky a do rukou leteckých modelářů a dalších nadšenců létání.

Bezpilotní systémy v civilním sektoru mají všestranné využití: v logistice, průzkumu, mapování terénu, v oblasti krajinného rozvoje a hospodářství, ve stavebnictví, v urbanistickém plánování, v integrovaném záchranném systému a dalších oblastech. Klasifikací bezpilotních systémů se zabývám v kapitole 2 – Klasifikace UAS.

Není proto divu, že trh s bezpilotními systémy zaznamenal v posledních letech bouřlivý rozvoj. S velkým potenciálem využití bezpilotních systémů vyvstávají nemalé výzvy v mnoha odvětvích letecké dopravy.

Prudký rozvoj provozu bezpilotních systémů přinesl nutnost integrace do stávajícího vzdušného prostoru s již tak vytíženou kapacitou. Z toho důvodu vzniklo na nadnárodní úrovni několik zastřešujících iniciativ pro komplexní reformu organizace provozu vzdušného prostoru. Těmito iniciativami se zabývám v kapitole 3 – Přehled vývoje antikolizních systémů.

Vývoj a cenné testování antikolizních systémů pro bezpilotní systémy probíhá na univerzitách a dalších výzkumných ústavech po celém světě, a to včetně ČVUT. Na tomto poli zaznamenal domácí tým z Fakulty elektrotechnické mezinárodní úspěch: vítězství v soutěži bezpilotních

systemů MBZIRC 2017 v Abu Dhabi. Jejich poznatky z výzkumu představuji v kapitole 4 – Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT.

Celá tato práce vyústila v návrh hardwarového konceptu s vizí spolehlivého, kompatibilního a modulárního antikolizního systému pro většinu bezpilotních systémů. Více v kapitole 5 – Návrh požadavků na antikolizní systém.

Závěrem shrnuji a hodnotím vývoj a výsledky této bakalářské práce.

Při psaní práce jsem čerpal z velkého množství zejména anglickojazyčných zdrojů, viz seznam literatury.

1. Vymezení pojmů

V této kapitole se zabývám vysvětlením pojmů antikolizní a bezpilotní systém.

1.1. Antikolizní systém

Rok 1956, ve kterém došlo ke srážce Lockheed Constellation a Douglas DC-7 nad Velkým kaňonem, znamenal počátek vývoje antikolizních systémů pro dopravní letadla. Antikolizním systémem rozumíme hardwarové zařízení a souhrn pravidel, podle kterých se zařízení řídí. Celý systém pak má za cíl předejít vzdušným srážkám mezi letadly [1].

U dopravních letadel se jedná o dobře známý ACAS – Airborne Collision Avoidance, a TCAS – Traffic Alert and Collision Avoidance System. Oba termíny jsou zdánlivě podobné, ale nejsou zaměnitelné. ACAS je standard, souhrn pravidel, a TCAS je jejich reálná implementace – tedy samotné fyzické zařízení a software v letadle. V dnešní době je v praxi používán TCAS 7.0 a 7.1, který splňuje standard ACAS II. Jedná se o systém, který je založen na principu vydání příkazu a koordinaci vzájemného vertikálního úhybného manévru letadel [2].



Obrázek 1 - typické grafické zobrazení systému TCAS na displeji v kokpitu (pozn. minimální bezpečný vertikální rozestup mezi letovými hladinami je 1000 ft - ATC) [3]

Obrázek ilustruje značnou část schopností systému TCAS. Náš letoun se nachází v oblasti nad letištěm v Denveru. V bezpečné vzdálenosti od letadla letí dva stroje; letadlo v přímém letu 1000 ft nad naší letovou hladinou a klesající letoun 1000 ft pod naší letovou hladinou. V bezprostředním okruhu letadla do 2,5 NM se nachází dva tzv. narušitelé (intruders); na západ od letadla je žlutě zobrazené tzv. TA (Traffic Advisory), upozornění na letoun, který se nachází

200 ft pod naším letadlem a stoupá. Pokud tento letoun výrazně nezmění trajektorii svého letu, tak neletí v kolizním kurzu, a proto na něj systém pilota pouze upozorňuje. Na východ je červeně vyznačené tzv. RA (Resolution Advisory) – letoun se nachází 200 ft nad naším letadlem v přímém letu a letí v potenciálně kolizním kurzu – pro naše letadlo představuje možnou bezprostřední hrozbu. V takovém případě vydá systém TCAS několik desítek vteřin před srážkou pokyn oběma letadlům k provedení úhybného manévru.

Resolution znamená v překladu také „řešení“, proto na základě různých parametrů přikáže systém TCAS jednomu letadlu stoupat a druhému klesat, a dále průběžně upravuje strmost manévru v závislosti na přesnosti jeho provedení piloty, dokud není bezprostřední nebezpečí odvráceno – v takovém případě systém zahlásí „clear of conflict“.

Pro své fungování musí systém TCAS znát polohu a výšku okolních letadel. Zbylé údaje, jako např. kurz a rychlost, systém dopočítá. Zdrojem těchto dat byl doposud odpovídač módu S, pasivní kooperativní systém, který je postupně nahrazován vyspělejší systém ADS-B – ten bude povinně instalován u všech letadel v Evropě do 7. června 2020 a ve Spojených státech do 1. ledna 2020 [4].

Systém ADS-B je klíčová komponenta evropské transformace vzdušného prostoru SESAR (z angl. Single European Sky ATM Research). Vize SESAR staví na konceptu ‚trajectory-based operations‘ a spoléhá na poskytování služeb letecké navigace tak, aby letouny mohly létat po efektivních přímých trasách bez omezení současného vzdušného prostoru [5]. V širokém kontextu dojde ke značné úspoře času, paliva, peněz a v konečném důsledku ke zmírnění projevů klimatických změn.

Na rozdíl od pasivního kooperativního odpovídače módu S je systém ADS-B aktivní kooperativní systém, tzn. automaticky vysílá údaje o poloze, rychlosti a výšce letadla. Dalším výrazným zlepšením oproti odpovídači módu S je frekvence poskytování údajů; zatímco odpovídač se dotazuje na informace jednou za 4-12 sekund, systém ADS-B vysílá údaje s frekvencí 1 Hz, tedy každou sekundu [6].

1.2. Bezpilotní systém

Definice Úřadu pro civilní letectví je následující:

„Bezpilotní systém (UAS) je systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bepilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více [7].“

Z hlediska terminologie platí, že bezpilotní systém je obecné označení pro UAV používaný k průzkumným nebo útočným akcím. Pojem „dron“ se ujal jako specifické označení pro bezpilotní systémy používané v armádě, a nebudu jej proto v této práci užívat.

2. Klasifikace UAS

Vzhledem k velké rozmanitosti bezpilotních systémů neexistuje univerzální rozdělení, které by platilo celosvětově. Doposud každý stát a instituce dělil bezpilotní systémy jinak podle vlastních potřeb a kritérií. Za několik měsíců však začne platit jednotná legislativa pro celou EU dle návrhu agentury EASA, které se věnuji v další podkapitole.

2.1. ČR – Doplněk X

Předpisy pro létání s bezpilotními systémy v ČR spadají pod správu Úřadu pro civilní letectví a jsou vymezeny v leteckém předpisu L2 Doplněk X – bezpilotní systémy [8]. Poslední, v pořadí šestá změna Doplněk X proběhla 16. 11. 2017 [9].

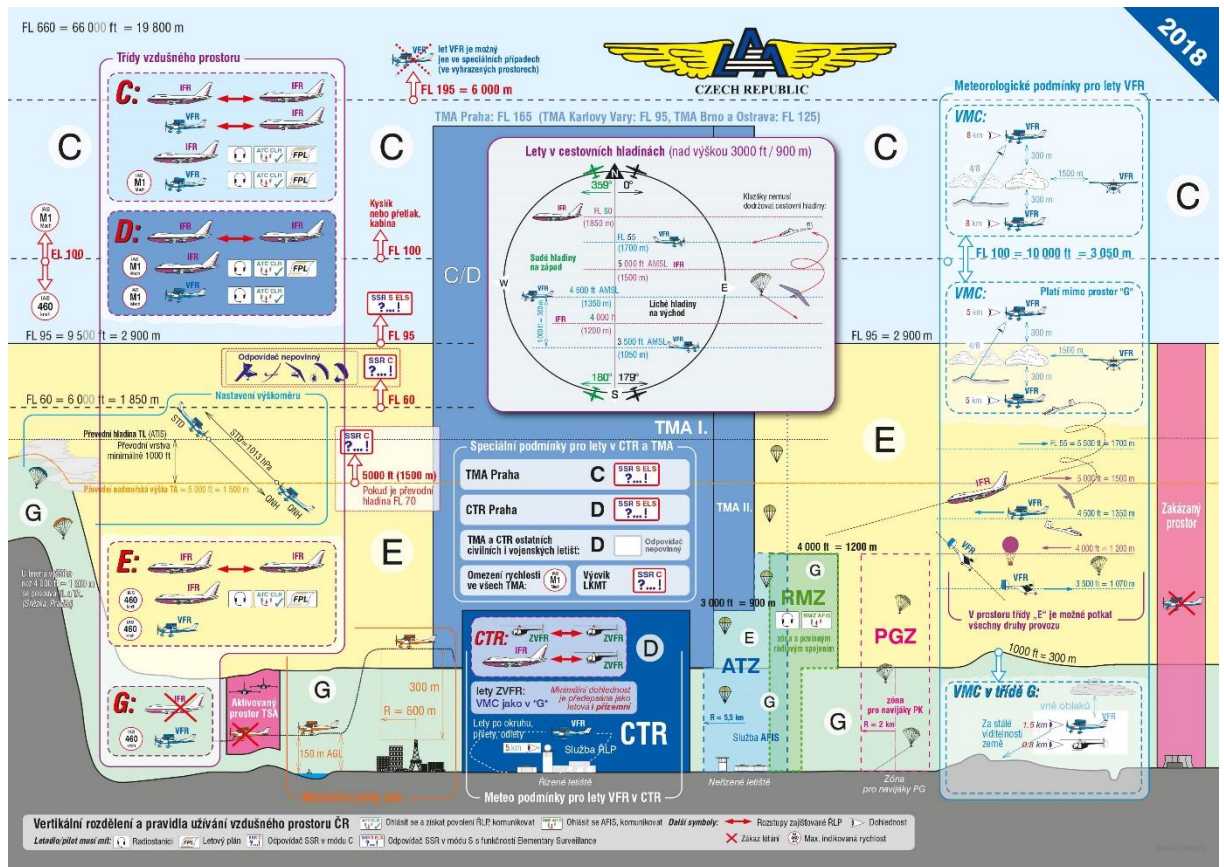
Pro účely Doplněk X jsou bezpilotním systémem myšlena všechna bezpilotní letadla, vyjma modelů letadel. Modely letadel jsou definovány jako letadla do 25 kg, která nejsou schopná nést člověka na palubě, nejsou vybavena žádným zařízením umožňujícím autonomní let na zvolené místo, a jsou proto po celou dobu letu řízena na dálku pilotem pomocí ovladače na základě jeho vizuálního kontaktu s modelem. Rozdíly mezi legislativní definicí bezpilotního prostředku a modelu letadla jsou tedy dva; bezpilotní systémy jsou schopny (podle definice) autonomního letu, a to jim umožňuje let za hranicí vizuálního dohledu pilota [9].

Doplněk X vyžaduje, aby měl pilot s bezpilotním systémem stálý vizuální kontakt. Dále musí pilot zaznamenávat informace o letu do deníku – není specifikováno jakého – mezi které patří: „datum letu, jméno pilota, označení letadla, místa vzletu a přistání, celková doba letu, druh letové činnosti a potenciální události související s bezpečností letu“ [9].

Bezpilotní systém s MTOW vyšší než 0,91 kg musí být vybaven systémem, který v případě závady na letadle provede ukončení letu (obdobu autopilota u tříd C1 – C3 v klasifikaci EASA). Zároveň nezbavuje pilota odpovědnosti za bezpečnost celého letu včetně fází, kdy je letadlo ovládáno automatickými systémy.

2.1.1. Provoz UAS ve vzdušných prostorech

Schéma rozdělení vzdušného prostoru ilustruje následující obrázek:



Obrázek 2 - Schéma rozdělení vzdušného prostoru ČR [10]

Přehlednější interaktivní mapa vzdušných prostorů je zprostředkována webovou aplikací AisView, vyvíjenou Řízením letového provozu [11].

Mimo výjimky udělené ÚCL (případně ŘLP) může být let UAV prováděn pouze v následujících prostorech:

- Ve vzdušném prostoru třídy G [8], který sahá do výšky 300 m AGL
- V provozní zóně ATZ v okruhu 5,5 km od neřízeného letiště [8]
 - Bezpilotní systémy do hmotnosti 0,91 kg smějí v této zóně létat do výšky 100 m AGL bez schválení
 - Bezpilotní systémy o hmotnosti nad 0,91 kg smějí létat do výšky 300 m AGL po dohodě s provozovatelem nebo letištní informační službou (AFIS)

- V případě dostupnosti AFIS lze létat až do horní hranice ATZ – 4000 ft AMSL
 - V zóně CTR řízených letišť [8]
 - Stejně jako v zóně ATZ smějí bezpilotní systémy do hmotnosti 0,91 kg létat do výšky 100 m AGL i ve vzdálenosti nižší než 5,5 km od vztažného bodu letiště, ale vždy mimo ochranné zóny letiště (které jsou nejčastěji ve směru vzletových a přistávacích drah)
 - Bepilotní systémy o hmotnosti nad 0,91 kg smějí létat jen ve vzdálenosti vyšší než 5,5 km od vztažného bodu letiště a zároveň ve výšce do 100 m AGL
 - a) Při splnění podmínek v předchozích dvou bodech neplatí požadavky předpisu L11; nutnost letového povolení a stálé obousměrné spojení se stanovištěm ŘLP a vybavení odpovídačem SSR
 - b) Při nesplnění podmínek je povinnost plnění požadavků předpisu L11 ponechána na rozhodnutí příslušného stanoviště ŘLP
 - Konkrétně se vztahuje na dva případy; při pohybu bezpilotních systémů jakékoli hmotnosti ve výšce nad 100 m AGL nebo při letu bezpilotních systémů o hmotnosti převyšující 0,91 kg ve vzdálenosti nižší než 5,5 km od vztažného bodu letiště

Kromě výjimek udělených Úřadem pro civilní letectví nesmí být model letadla nebo bezpilotní systém provozován v prostorách TSA (Temporary Secured Area) a TRA (Temporary Restricted Area), které slouží pro cvičení vojenských pilotů a jako koridory k přeletům mezi cvičnými prostory. Jak vyplývá z názvu, koridory jsou aktivní jen přechodně – v případě, že aktivní nejsou, mění se na vzdušný prostor třídy G [8].

Dále se bezpilotní systém nesmí pohybovat v zakázaných (LKP prohibited) a omezených (LKP restricted) prostorech. Ty jsou trvale aktivní a vyskytují se v okolí jaderných elektráren nebo muničních skladů [8].

Tabulka 2 – klasifikace dle Doplnku X

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 25 kg		> 25 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití ----- požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LČPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

2.2. EASA

Čerstvý vítr do plachet přináší evropská agentura EASA, která v únoru roku 2018 vydala propracovaný dokument Opinion 01/2018 [12].

Svým přístupem zahrnuje tento legislativní rámec všechny bezpilotní systémy nezávisle na jejich hmotnosti a dělí je do 3 kategorií; ‚open‘, ‚specific‘ a ‚certified‘.

Jako odpověď na požadavky trhu byl hlavní důraz kladen na kategorie ‚open‘ a ‚specific‘, pod které spadá většina masově provozovaných bezpilotních systémů. Tyto kategorie tak představují nejpalčivější problém v integraci bezpilotních systémů do vzdušného prostoru. Dalším posunem vpřed je zvolení co nejsvobodnějšího a decentralizovaného ‚operation centric‘ přístupu.

Legislativní rámec EASA bere v potaz jak technické požadavky, jako například vzdálenou identifikaci bezpilotních systémů, tak provozní požadavky, např. systém monitorující polohu se schopností upozornit pilota při vstupu do zakázaných zón. V neposlední řadě pak uzákoňuje registraci pilotů létající se stroji o hmotnosti nad 0,25 kg a dále ustanovuje jejich vyžadovanou kvalifikaci.

Ke kategoriím:

S přihlédnutím k možným rizikům nevyžaduje kategorie ‚open‘ ani předletové schválení kompetentním orgánem, ani oznámení (tzn. letový plán) od pilota bezpilotního systému.

Kategorie ‚specific‘ vyžaduje předletové schválení kompetentním orgánem, přičemž se berou v potaz zmírňující opatření, která jsou vyjádřena v předletovém zhodnocení rizik. Výjimkou z povinnosti schválení jsou určité standardní letové scénáře, nebo pokud je pilot držitelem ‚light UAS operator‘ kvalifikace s příslušnými privilegii. V těchto dvou případech stačí oznámení od pilota bezpilotního systému.

Kategorie ‚certified‘ vyžaduje jak předletové schválení, tak oznámení od pilota bezpilotního systému. Navíc je vyžadována certifikace pro bezpilotní systém i jeho pilota.

Tabulka 3 - rozdělení kategorií v rámci legislativního návrhu agentury EASA

	MTOM [kg]	max. výška AGL [m]	Poznámky
‚open‘	max. 25	max. 120	VLOS
‚specific‘	nad 25	nad 120	BVLOS, registrace pilota
‚certified‘	TBA		

2.2.1. Kategorie ‚open‘

V rámci kategorie Open je vyžadován odstup v okruhu 50 m od budov vyšších než 120 m. Lety nad lidmi jsou možné, nicméně by nad nimi měl pilot trávit co nejméně času. Let nad shromážděním osob je v rámci této kategorie zakázán.

Byly vytvořeny 3 **subkategorie**, které definují provoz bezpilotních systémů v blízkosti lidí:

- A1: lety nad lidmi, ale ne nad shromážděními osob na volném prostranství
- A2: lety v blízkosti lidí s bezpečným odstupem
- A3: lety daleko od lidí

Dále je na bezpilotní systémy nahlíženo z hlediska technických požadavků a jsou rozděleny do **pěti tříd**:

- C0: Možnost provozu nad lidmi. Max. rychlost byla omezena na 19 m/s (68 km/h) za účelem zamezení létání lehkých závodních bezpilotních systémů nad lidmi, které byly tímto přesunuty do třídy C3
- C1: design osvětlení u bezpilotních systémů pro noční provoz musí být odlišný od osvětlení letadel s posádkou
- C2: vybavení pilotem ovládaného nízkorychlostního módu na 3 m/s, který umožní bezpečný pohyb bezpilotního systému v blízkosti osob až na vzdálenost tří metrů
- C4: do této třídy spadají modely letadel. Z důvodu zachování jejich postavení ‚mimo‘ bezpilotní systémy je tato kategorie osvobozena od povinnosti automatických kontrolních módů (autopilota)

Kategorii ‚open‘ shrnuje tabulka na následující straně:

Tabulka 4 - detailní rozdělení kategorie 'open' s přiřazením korespondujících tříd UAS

PROVOZ		Požadavky na pilota	UAS				Registrace pilota
subkategorie	Prostor provozu (daleko od letišť, max. 120 m AGL)		třída	MTOM [kg]	Technické požadavky	Elektronické ID	
A1 lety nad lidmi	Lety nad lidmi povoleny, ne však nad shromážděním	Přečíst informace pro spotřebitele	Vlastnoručně postavené	< 0,25	N/a	Ne	Ne
			C0		Info pro spotřebitele, < 19 m/s, bez ostrých hran, volitelný limit výšky		
		<ul style="list-style-type: none"> ○ Info pro spotřebitele ○ Online kurz ○ Online test 	C1	< 0,9 nebo energie > 80 J	Info pro spotřebitele, < 19 m/s, limit kinetické energie, mechanická odolnost, autopilot při ztrátě signálu, bez ostrých hran, volitelný limit výšky	Ano + sériové číslo pro identifikaci	Ano
A2 lety v blízkosti lidí	Lety v bezpečné vzdálenosti od lidí	<ul style="list-style-type: none"> ○ Info pro spotřebitele ○ Online kurz ○ Online test ○ Teoretický test v instituci uznávané leteckým úřadem 	C2	< 4	Info pro spotřebitele, mechanická odolnost, autopilot při ztrátě signálu, bez ostrých hran, volitelný limit výšky, křehkost konstrukce při pádu, nízkorychlostní mód		
A3 lety daleko od lidí	Lety v prostoru vzdáleném od obydlených míst, kde není očekáván výskyt lidí	<ul style="list-style-type: none"> ○ Info pro spotřebitele ○ Online kurz ○ Online test 	C3	< 25	Info pro spotřebitele, autopilot při ztrátě signálu, volitelný limit výšky, křehkost konstrukce při pádu	Pokud vyžadováno	
			C4 modely letadel		Info pro spotřebitele, bez autopilota		

Z hlediska dvou proměnných; hmotnosti a vzdálenosti letů od lidí (tedy subkategoriím A1 – A3) jsou třídy ohodnoceny podle míry rizikovosti:

- C0: nejnižší riziko
- C1, C4: C1 díky nízké hmotnosti a C4 díky letům vzdáleným od lidí představují nízké riziko
- C3: provoz daleko od lidí nevylučuje možnost zneužití nebo nehody. Proto třída C3 o nejvyšší hmotnosti představuje vysoké riziko
- C2: kombinace vysoké hmotnosti a letů v blízkosti lidí představuje nejvyšší riziko

Dále platí, že bezpilotní systémy všech tříd, vyjma třídy C4, musejí být osazeny elektronickým identifikačním systémem (e-identification), který bude vysílat:

- registrační číslo pilota
- sériové číslo UAV
- geografickou polohu a výšku (geo-awareness)
- bod vzletu
- časový údaj

2.2.2. Kategorie ‚specific‘

Veškeré lety, které nesplňují operační požadavky, spadají do kategorie ‚specific‘. Jako příklad konkrétní situace bych zmínil nestandardní provoz nespádající do subkategorií A, nebo provoz bezpilotních systémů nespádající do tříd C. Například let ve vyšší výšce než 120 m AGL, s těžším bezpilotním systémem než 25 kg nebo mimo vizuální dohled pilota.

V takovém případě budou lety podléhat předletovému zhodnocení rizik a budou podniknuta příslušná zmírňující opatření.

2.2.3. Kategorie ‚certified‘

Do kategorie ‚certified‘ spadají všechny operace, které neprodjou předletovému zhodnocení rizik kategorie ‚specific‘. Při těchto operacích musí být drony certifikovány, musí být přítomen pilot s licenci a povolením kompetentního úřadu v dané zemi [13].

2.3. Srovnání

Doplněk X, respektive vzdušný prostor třídy G, velkoryse počítá s pohybem bezpilotních systémů až do výšky 300 m AGL. Dále jsou v něm ošetřeny lety v bezprostřední blízkosti letišť.

Na rozdíl od novější klasifikace EASA, Doplněk X nepočítá s lety BVLOS a lety nad lidmi nebo v jejich blízkosti.

Právě od možnosti létání nad lidmi se odvíjí jiné hmotnostní rozdělení kategorií, kde EASA u letů v blízkosti osob končí již u hranice 4 kg. Další devizou klasifikace podle EASA je rozdělení do tříd podle technických požadavků, kdy je např. u třídy C2, s ohledem na provoz v blízkosti osob, vyžadována křehkost konstrukce a tzv. ‚low speed mode‘. Tak daleko se Doplněk X nepouští.

3. Přehled vývoje antikolizních systémů pro bezpilotní systémy v zahraničí a ČR

Integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru, jejíž podmínkou je spolehlivý a bezpečný antikolizní systém, je globální problém. K porozumění problematiky z více perspektiv věcně představím probíhající programy a projekty na Evropské úrovni a ve Spojených státech, se kterými úzce souvisí integrace v České republice.

Subkapitoly 6.2. a 6.3. probírají operačně koncepční přístup integrace bezpilotních systémů do vzdušného prostoru, zatímco kapitoly 6.4. a 6.5. se zabývají operačně technologickými požadavky – tedy ve zkratce konkrétními letovými testy. Program SESAR 2020 a jeho součást projekt U-Space, představené v kapitole 6.1., obsahují zároveň oba dva přístupy.

Operačně koncepční a operačně technologický přístup jsou vzájemně provázány a doplňují se. Neplatí nutně, že koncept předchází technologie; technologie mohou zpětně pozměnit koncept. Nicméně většinou platí, že systémy započaté kvalitním a velkorysým konceptem jsou z dlouhodobého hlediska spolehlivější.

3.1. Evropa: U-Space

V Evropě probíhá inovativní program SESAR 2020, který staví na svém předchůdci SESAR1 a má za cíl do roku 2024 dodat leteckému průmyslu „vysoce výkonnostní operačně technologická řešení“. S rozpočtem 1,6 miliardy Eur bude podporovat projekty ve 4 oblastech [5]:

- Airport operations (letecké operace)
- Network operations (síťové operace)
- Air traffic services (služby řízení letového provozu)
- Technology enablers (zavádění technologií)

Pod program SESAR 2020 spadá odnož U-Space, jejíž záměr je následující:

„Jasný rámec na úrovni Evropské unie umožní vytvoření pravého evropského trhu pro služby bezpilotních prostředků, čímž ‚zkrotí‘ potenciál vzniku nových pracovních míst a růstu v tomto ekonomickém odvětví“ [5].

Tuto misi projekt U-Space naplňuje postupně prostřednictvím 4 vývojových pilířů [5]:

U1: základy služeb pokrývající e-registraci, e-identifikaci a geofencing

U2: iniciace služeb pro řízení operací bezpilotních prostředků zahrnující: letové plánování, sledování a napojení na konvenční řízení letového provozu

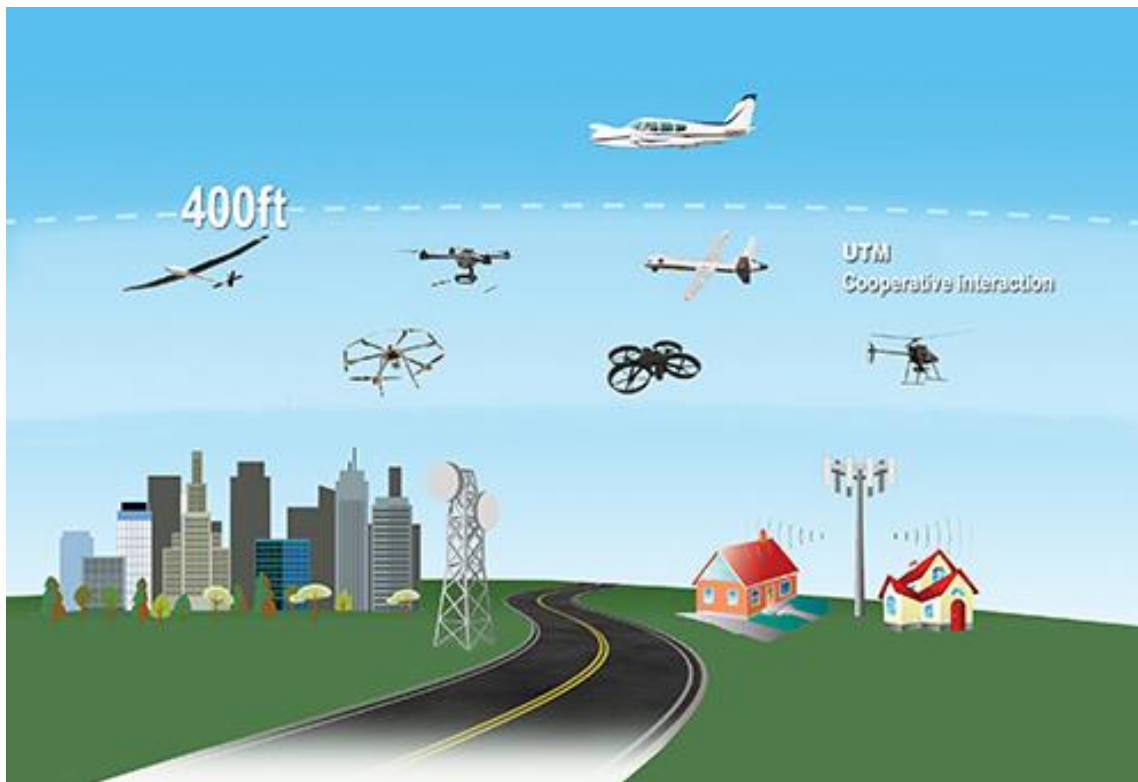
U3: pokročilé služby podporující složitější operace ve vzdušných prostorech s hustým provozem, jako např. funkce ‚detect and avoid‘ (= antikolizní systém)

U4: plně vyvinuté služby schopné vysoké míry automatizace, konektivity a digitalizace jak pro bezpilotní systém, tak ekosystém U-Space.

Dle definice tak U-space zahrnuje sadu služeb, které spoléhají na vysoký stupeň digitalizace a automatizace funkcí a dále na konkrétní postupy navržené za účelem podpory bezpečného a efektivního přístupu do vzdušného prostoru velkým počtem bezpilotních systémů. To činí U-space zastřešujícím rámcem navrženým k usnadnění jakéhokoli druhu rutinní mise, ve všech třídách letového prostoru a ve všech prostředích – i těch nejvíce zahlcených – při současném adresování vhodného rozhraní letů s posádkou a při řízení letového provozu [5].

3.2. Spojené státy: NASA FAA UTM

Na základě předpovědi o stavu vzdušného prostoru mezi lety 2018-2038 vydané americkým FAA bude z dnešních 1,1 mil. vzdušný prostor Spojených států již v roce 2023 brázdit na 2,4 mil. modelářských bezpilotních systémů (týká se strojů do 25 kilogramů v soukromém vlastnictví) [14]. Jejich bezpečná integrace do vzdušného prostoru je proto klíčová. Za tímto účelem vytváří NASA ve spolupráci s FAA a dalšími partnery koncept UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management). Jako platforma pro spolupráci slouží výzkumné středisko NASA Ames Research Center v Silicon Valley [15].



Obrázek 3 - pole působnosti systému UTM se týká bezpilotních systémů do 25 kg MTOW létajících do maximální výšky 400 ft AGL

Tento projekt má, na rozdíl od evropského projektu MIDCAS a předchozího UAS-NAS, jako cílovou kategorii UAV do 25 kilogramů letících ve výšce do 400 ft AGL za hranicí vizuálního dohledu pilota (BVLOS) [16].

Po dokončení výzkumu předá NASA výsledky své práce regulačnímu úřadu FAA pro následnou implementaci [16], [15].

3.2.1. Vývojová stadia

Výzkum je rozdělen na 4 vývojová stadia – TCL (technology capability levels), z nichž tři již proběhla a čtvrté probíhá. Stadia 1 a 2 jsou integrována v dalších stadiích a obsahují úplné základy, nebudu je proto zmiňovat.

TCL3: dokončeno v květnu 2018; stadium se soustředilo na vytváření a testování technologií pro bezpečné rozestupy bezpilotní systémů. Byl vytvořen systém D&A umožňující detekci a úhybný manévry kooperujících i nekooperujících bezpilotní systémů nad středně hustě obydlenými oblastmi.

TCL4: testovací stadium bude dokončeno na přelomu srpna 2019, v čase odevzdání této bakalářské práce. Na výsledky 3. vývojového stadia bude použit pákový efekt a testování bude zaměřeno na operace v hustěji obydlených oblastech, jako např. zpravodajskou činnost nebo doručování balíků. Tyto testy také ověří technologie, které by mohly být použity ke zvládnutí eventualit širokého rozsahu.

V mezičase v lednu 2019 přišla FAA, zadávající instituce a partner, s následujícím návrhem změny pravidel pro získání povolení pro lety nad shromážděním osob a pro lety v noci [17]:

Co se týká letů nad shromážděními, úřad navrhl rozdělení bezpilotních systémů podle míry následků zranění, které by padající bezpilotní systém způsobil – podobně jako tomu je v případě rozdělení do tříd v kategorii „open“ evropské legislativy;

- Bepilotní systémy do hmotnosti 0,25 kg nevyžadují žádné povolení pro lety nad shromážděním osob
- Nad touto hmotností je výrobce povinen prokázat relativní bezpečnost při pádu – například tyto stroje nesmí mít nechráněně točící-se vrtule. Pokud se prokáže, že bezpilotní systém je schopen způsobit vážná zranění, tak smí nad lidmi létat za zvláštních podmínek, vyjma velkých shromáždění pod širým nebem (např. koncert).

Co se týká nočních letů, nebylo by dle návrhu nutné povolení za podmínek, kdy rekreační pilot bezpilotních systémů každé 2 roky projde teoretickým výcvikem a vybaví stroj osvětlením viditelným na vzdálenost 3 mil (4,83 km)

3.2.2. Technologie a testování

V rámci UTM chce NASA představit dva typy možných systémů:

První typ by byl přenosný UTM systém, který by umožnil operaci bezpilotních systémů v odlehlých oblastech, např. při vojenských operacích, pomoci po živelných pohromách nebo při konceptu ‚precision agriculture‘ [16].

Druhý typ by byl stálý UTM systém, který by poskytoval podporu při letech v nízké výšce nad terénem a souvisle by pokrýval určitou geografickou oblast. Oba dva systémy by vyžadovaly stálé pokrytí CNS [16].

V rámci NASA UTM jsou bezpilotní systémy testovány při letech BVLOS, tedy za hranicí vizuálního dohledu pilota. Testy probíhají na šesti letištích napříč Spojenými státy – ve státech New York, Virginia, Texas, Severní Dakota, Aljaška a Nevada. Tedy, co je důležité zdůraznit, v geografických oblastech s různorodým klimatem a světelnými podmínkami, které tak poskytují prostor pro vyladění systémů.

V průběhu posledních testů, které probíhaly od 15 května do 19 června 2018, se inženýři zabývali třemi výzvami: zohledněním poryvů větru, které mají velký vliv na přesnost úhybných manévřů u lehkých bezpilotních systémů, dále ochranou bezpilotních systémů před ptactvem a v neposlední řadě kyberbezpečností jednotlivých bezpilotních systémů i systému jako celku [18].

3.3. UTM v ČR

Vývoj a správa systému UTM v České republice spadá pod Řízení letového provozu ČR. ŘLP se podílí na programu „jednotného evropského nebe“ SESAR [19]; Single European Sky ATM Research, který cílí na proměnu evropského vzdušného prostoru v modulárně propojený, moderní a integrovaný ekosystém s flight a flow-based přístupem. Jedním z takových modulů je projekt U-Space, který byl blíže představen v kapitole 6.1. [5].

V srpnu 2018 „zvítězilo sdružení firem AirMap a UpVision v tendru na poskytování služby řízení bezpilotního letového provozu pro řízený vzdušný prostor v České republice. UTM Platforma společnosti AirMap bude nasazena za účelem poskytování situačního povědomí a možnosti podávání žádostí o provedení letů rostoucí komunitě provozovatelů dronů [20].“

Na českém poli pracuje na integraci bezpilotních systémů kromě ŘLP také mnoho dalších subjektů, které zaštiťuje UAV aliance. Počínaje rokem 2015 pořádá v Plzni každoročně konferenci, která poskytuje platformu pro sdílení plánů, poznatků a technologií zástupců ze státního, akademického a soukromého sektoru [21].

3.4. Evropa: MIDCAS

Jedná se o Evropskou spolupráci pod názvem Mid Air Collision Avoidance System, započatou v roce 2009 pod záštitou agentury EDA – European Defence Agency – s celkovým rozpočtem 50 milionů Eur¹. Cílem projektu je bezpečná integrace bezpilotních systémů do společného vzdušného prostoru. Na projektu se podílí 5 členských států EU – Francie, Německo, Itálie a Španělsko, pod vedením Švédska. Průmyslové konsorcium tvoří 11 následujících firem: švédský SAAB, francouzský Sagem and Thales, německé: Airbus Defense and Space, Diehl BGT Defense, DLR a ESG, italské: Alenia Aermacchi², CIRA, španělské: Selex ES a Indra [22].

Předpokládaný harmonogram z roku 2015³:

- 2018 – UAV vybavené systémem budou moci užívat vzdušné prostory určitých tříd
- 2023 – fungující systém ve vzdušných prostorech všech tříd se stejnou úrovní přístupu jako u letadel s lidskou posádkou [22]

3.4.1. Technologie a testování

Pro vyšší robustnost systému těží D&A mechanismus jak z kooperativního, tak nekooperativního přístupu; většina dopravních letadel bude od roku 2020 povinně vybavena systémem ADS-B, přesto největší hrozbu představuje kategorie GA a lehká letadla, nebo letadla, která budou mít systém ADS-B nebo odpovídač z různých důvodů vypnutý [23].

Na palubě testovacího UAS bylo umístěno 5 senzorů:

- kooperativní
 - ADS-B + IFF (Identification friend or foe interrogator – slouží ke klasifikaci okolních letadel jako přítel-nepřítel a k určení jejich relativní polohy a vzdálenosti)
- nekooperativní
 - Radar + elektrooptický senzor + IR kamera
 - FOV senzorů dosahovalo +/- 110 ° horizontálně a +/- 15 ° vertikálně

¹ Pro orientaci: rozpočet evropského projektu U-Space je 38 x vyšší

² Alenia Aermacchi od roku 2016 známá jako Leonardo Aircraft Division

³ Od roku 2015 jsou o projektu MIDCAS jen kusé nebo vágní zprávy

Úspěšné testování D&A (detect and avoid) systému proběhlo na vojenské letecké základně Grazzanise v Itálii. K prvnímu kolu testování posloužil letoun CASA C212 jako simulace UAS a Dassault Falcon 20 jako narušitel. Pro další testovací kola byl použit první evropský UAS s MTOW přesahující 1000 kg; Alenia Sky-Y společně s vojenským transportním letounem C-27J Spartan. Nejvyšší dosažená sblížovací rychlost se pohybovala kolem 240 kt, přičemž testování probíhalo ve dne [23].



Obrázek 4 - Dassault Falcon 20 simulující narušitele v 1. testovacím kole [44]



Obrázek 5 - CASA C212 simulující UAS v 1. testovacím kole [43]



Obrázek 6 - Alenia Sky-Y použitá v dalších kolech testování [45]



Obrázek 7 - Alenia C-27J Spartan [46]

3.4.2. Princip fungování

Vyvinutý systém reaguje ve 3 fázích:

1. Informuje pilota UAS o okolním provozu a potenciálním narušiteli (hrozbě).
2. Upozorní pilota na nutnost úhybného manévru. Pilot má v této chvíli možnost aktivovat automatický úhybný manévr.
3. Upozorní pilota na setrvávající hrozbu srážky. V této chvíli může pilot stále s předstihem aktivovat automatický úhybný manévr. V případě, že to neudělá, systém včas aktivuje automatický úhybný manévr [23].

Detect and Avoid (D & A) v 1. fázi má paralelu s TA generovaným aktuálně rozšířeným TCAS II. Fáze 2 a 3 má paralelu s RA u AP/FD TCAS systému, kterým je vybaven např. Airbus A380 [13].

Navíc, oproti aktuálně používané verzi systému TCAS umožňuje MIDCAS u úhybného manévru kombinaci horizontálního manévru se stoupáním, nebo klesáním⁴. S absencí posádky je možné provést agilnější úhybný manévr, na samotné hraně letové obálky UAS [23]. Tím jsou umožněny menší, a přitom stále bezpečné rozestupy mezi letadly, což v přímém důsledku vede ke zvýšení kapacity vzdušného prostoru.

⁴ TCAS II umožňuje jen manévry ve vertikální rovině, TCAS III i v horizontální, jeho přínos byl však v testech minimální, a jeho vývoj byl proto zastaven. TCAS IV využívá dodatečné informace z odpovídače módu S, jeho vývoj však byl ukončen s příchodem systému ADS-B.

3.5. Spojené státy: NASA UAS-NAS

Americkou paralelou pro evropský MIDCAS je studie vedená agenturou NASA pod zkratkou UAS-NAS; Unmanned Aircraft Systems Integration in the National Airspace System. Projekt odstartoval v roce 2011 ve spolupráci s FAA, komisí RTCA a firmami z oblasti aerospace z komerční sféry se společným cílem; kombinací nejlepších dostupných technologií vyvinout „minimum operational performance standards“ pro bezpečný pohyb bezpilotních systémů [18].

V rámci této studie testovala NASA v dubnu 2016 na Edwards Air Force Base v Kalifornii D & A schopnosti systému ADS-B [18]. K testování byla použita Ikhana (NASA modifikace armádního dronu General Atomics MQ-9 Reaper/Predator B); bezpilotní systém s rozpětím 20 m, dostupem 40 000 ft a MTOW přesahující 4500 kg; a Beechcraft King Air 200; desetimístný turboprop s MTOW 5700 kg [6].



Obrázek 8 - Ikhana a Beechcraft King Air 200, na kterých byly prováděny testy

Byly navrženy a testovány různorodé scénáře vzájemných sblížení obou strojů, při kterých se role narušitele mezi Ikhanou a Beechcraftem střídaly. Oba letouny byly osazeny jednotkou ADS-B – modelem Garmin GDL-90, která zásobovala daty systém TCAS [6], [18].

V průběhu 11 týdnů testování nalétala Ikhana 98 letových hodin, při kterých úspěšně proběhlo 325 těsných úhybných manévrů [18].

4. Mezinárodní výzkum bezpilotních systémů se spoluúčastí ČVUT

Úspěšný výzkum nejen na poli antikolizních systémů probíhá ve spolupráci s University of Pennsylvania a University of Lincoln na Katedře kybernetiky FEL i na naší vysoké škole pod samostatnou Katedrou Multi-robot Systems. Tým MRS, vedený Martinem Saskou, vybojoval čelní umístění v prestižní soutěži MBZIRC 2017, která se konala v Abu Dhabi ve Spojených arabských emirátech. Soutěž se skládala ze tří disciplín; tým MRS vyhrál ze 143 soutěžících týmů první místo v disciplíně kooperativního sběru objektů skupinou autonomních helikoptér a druhé místo v kategorii autonomního přistání na jedoucím vozidle. Tato umístění umožnila týmu účast ve finální soutěži, ve které se umístil společně s italskou University of Padua na 2. místě [24]. Tyto nesporné výsledky přinesly prestiž celému týmu a ČVUT, výzkum týmu MRS byl přínosem pro robotickou komunitu a v neposlední řadě zajistil financování dalšího výzkumu.

Tým zvolil flexibilní přístup, pečlivě zvolil použité technologie a software a rozhodně neopomenul testování a přípravy na rozdílné klimatické a světelné podmínky ve Spojených arabských emirátech.

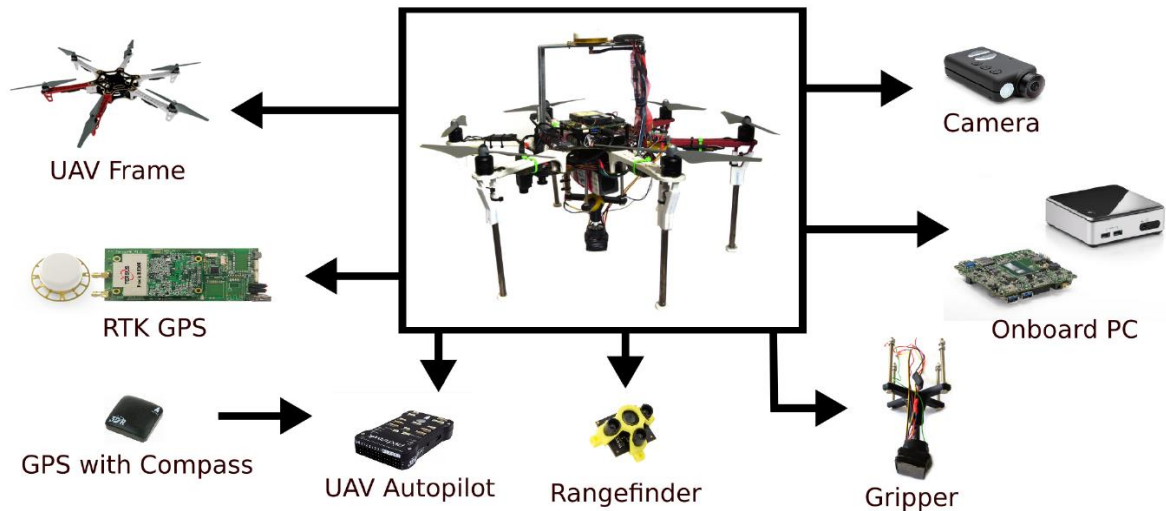
Z těchto důvodů jsem se rozhodl představit a přeložit práci týmu MRS, z jejichž výsledků budu čerpat v kapitole 8, [Návrh požadavků na antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAV](#). Za velmi cenná považuji [Pravidla antikolizního systému](#), o kterých budu psát již v kapitole 7. 1. 2.

4.1. Soutěžní konfigurace při MBZIRC 2017

4.1.1. Přehled použitého hardwaru

Jako konstrukce byla zvolena tzv. off the shelf setup, již hotová konstrukce osazená senzory, která je schopna autonomního letu. Dále bylo nutné vytisknout několik součástí na 3D tiskárně.

Ve výsledku je sestava bezpilotního systému následující:



Obrázek 9 - sestava bezpilotní systému použitého v soutěži MBZIRC 2017 a dalším výzkumu [25]

- Rám DJI hexakopter F550 (rozměry bezpilotního systému 120 x 120 x 50 cm)
- Elektromotory DJI E310
- PixHawk flight controller (autopilot)
 - Tříosý akcelerometr
 - Gyroskop se senzorem tlaku vzduchu k určení výšky
 - Přijímač signálu GPS
 - Magnetometr
- Radio-modul XBee-Pro

Lokalizaci zajišťoval GNSS modul připojený na PixHawk flight controller, který ale samotný nezajišťuje dostatečnou přesnost pro bezkolizní let. Proto byla použita pozemní stanice RTK-GNSS (Real Time Kinematic) Tarsus Precis-BX305, která správně kalibrovaná umožnila přesnost s chybou jen 10 mm v horizontálním směru a 15 mm ve vertikálním. Pro funkci RTK GPS musí mít systém RTK FIX, který záleží na síle signálu GNSS a kvalitě spojení mezi pozemní stanicí a bezpilotním systémem [25].

Přístup týmu MRS počítal s nasazením bezpilotní systémů v krizových situacích, kdy může dojít ke ztrátě signálu GNSS, nebo signál nemusí být vůbec k dispozici. V takovém případě je bezpilotní

system vybaven záložními systémy k určení výšky a vzájemné polohy bezpilotních systémů od okolních překážek [25];

Druhý způsob určení nadmořské výšky je pomocí barometru, který je součástí autopilota PixHawk. Pro přesný úchop objektů nebo přistání nicméně nestačí znát výšku AMSL, která navíc není dostatečně přesná, ale je zapotřebí znát výšku AGL, která je určena laserovým měřičem TeraRanger One. Laserový měřič ovšem není možné použít v případě, kdy je zakryt neseným objektem [25].

V takovém případě zajišťoval určení výšky klíčový prvek navigačních a antikolizních systémů – kamera Highres Mobius ActionCam (mvBlueFOX-MLC200w v následném vývoji [26]), která v soutěži sloužila k detekci přepravovaných objektů a k relativní vizuální lokalizaci [25].

Ke zpracování obrazu a koordinaci pohybů UAV dodával výpočetní výkon kapesní počítač Intel NUC osazený čtyřjádrovým procesorem Intel i7 5557U v konjunkci s 8 GB pamětí RAM, přičemž pro zpracování obrazu bylo využito jen jedno procesorové vlákno a zbylá tři jádra sloužila pro výpočty algoritmů. Vzájemnou komunikaci mezi bezpilotními systémy zajišťoval integrovaný WiFi čip [26].

4.1.2. Pravidla pohybu bezpilotních systémů při soutěži

Cílem týmu bylo vytvořit decentralizovaný (terminologií U-Space a MIDCAS: ‚flight centric‘, ‚operation centric‘) a ‚off the shelve‘ antikolizní systém, který bude možné nasadit v reálných situacích. Takový systém, dle autorů, do té doby neexistoval [27].

Pro urychlení vzájemné komunikace mezi bezpilotními systémy a pro její co nejvyšší efektivitu byl systém navržen k fungování bez potvrzování a opakování příkazů, což umožnilo vzájemnou komunikaci na frekvenci 5 Hz (pětkrát za sekundu) a predikci trajektorií v horizontu 8 sekund. V reálném použití tyto parametry umožňují bezpečný let bezpilotních systémů až do rychlosti 50 km/h [27].

Komunikace mezi bezpilotními systémy byla založena na přístupu ‚Finite-state machine‘⁵ s následující základní podmínkou pro sblížení [25]:

⁵ FSM neboli Finite-state machine je výpočetní model pro simulaci sekvenční logiky. FSM sestává z konečného počtu (ze slova ‚finite‘) stadií (states) a přechodů (transitions). Najednou může být aktivní pouze jedno stadium. Při určitém vstupu dochází k přechodu do nového stadia [42].

„Vyhnutí se budoucím kolizím je založeno na předpovědích sblížení v časoprostoru v rámci předpokládaných trajektorií bezpilotních systémů.“ [27]

Tato podmínka dále vedla k určení následujících pravidel a vlastností systému:

Systém je navržen pro maximální počet 3 bezpilotních systémů, pohybujících se ve stejném vzdušném prostoru. Pro jednoduchost má každý bezpilotní systém přiřazenou dedikovanou letovou hladinu, ve které se smí pohybovat. To znamená, že kolize může nastat jedine v případě, kdy bezpilotní systém opustí svou letovou hladinu, při soutěži tedy například při sběru objektu ze země [25].

Pokud bezpilotní systém stoupá do cílové letové hladiny, která je obsazena jiným bezpilotním systémem, je zvolena dočasná hladina co nejbliže původní cílové hladině. V této dočasné hladině stoupající bezpilotní systém vyčkává buď do uvolnění cílové hladiny, anebo po dobu 90 sekund, kdy čekající bezpilotní systém označí detekci bezpilotního systému v cílové hladině jako ‚false positive‘ a pokračuje ve stoupaní [25].

Ke zvýšení agility bezpilotních systémů a zmenšení ochranné zóny kolem každého z nich na minimum jsou při úhybném manévru v ovladači PixHawk deaktivovány vestavěné limity pro akceleraci, což umožní vyhýbajícímu se bezpilotní systému provést hbitější manévr – podobně jako v případě evropského projektu MIDCAS. Zároveň bezpilotní systém s vyšší prioritou spolupracuje tím, že naopak dočasně zpřísní rychlostní omezení [27].

Cílem týmu bylo vyvinout antikolizní systém, který bude bezpečný i v případě, že nastane výpadek vzájemné komunikace mezi bezpilotními systémy. V případě, že tato situace nastane, jsou poslední známé polohy bezpilotních systémů a jejich předpokládané trajektorie brány systémem jako platné po dobu 5 sekund.

V soutěži měly bezpilotní systémy sesbírat objekty rozmístěné po aréně a doručit je do ohraničeného čtvercového prostoru. Nad tímto prostorem bezpilotní systémy neshazovaly objekt z původní letové hladiny, ale sestoupaly níže – podobně jako v reálné situaci při sběru zboží z firemního skladu. Aby nedošlo ke srážce bezpilotních systémů nad tímto prostorem, měl v případě výpadku komunikace každý bezpilotní systém přiřazené časové okno, ve kterém se nad tímto prostorem směl pohybovat [25].

4.2. Rychlá vzájemná relativní lokalizace bezpilotních systémů za použití LED značek

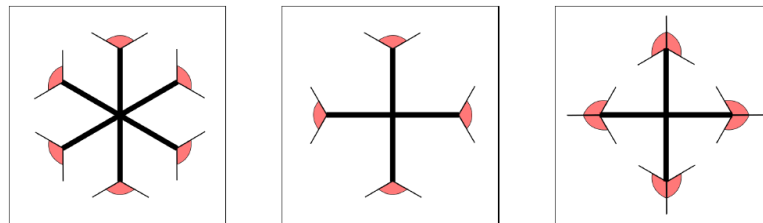
Přístup představený v předchozí podkapitole nebyl jediným, který tým ČVUT vyvinul a otestoval. Novější, posoutěžní výzkum z roku 2018 se soustředil na vzájemnou lokalizaci bezpilotních systémů za použití LED pruhů umístěných na rámech bezpilotních systémů [28]:

4.2.1. Motivace pro vývoj systému

Podobně jako v případě vývoje systému do soutěže MBZIRC 2017 se i tentokrát tým zaměřil na vývoj robustního, na infrastrukturu nezávislého systému pro relativní lokalizaci většího počtu bezpilotních systémů, který by fungoval uvnitř i venku. Navíc si přidal podmínku na nízké výpočetní požadavky. Využil proto vlastností ultrafialového světla, které lze za pomoci kamery se speciálním UV filtrem Midopt spolehlivě detekovat [28].

4.2.2. Fungování systému

Každý UAS byl osazen LED pruhou ProLight PM2B-1LLE, jejichž maximální vyzařování se pohybovalo kolem vlnové délky 395 nm⁶. Rozmístění diod na rámu, co nejdále od sebe se ukázalo jako klíčové. Celý rám bezpilotního systému tak fungoval jako značka.



Obrázek 10 - rozmístění a úhel vyzařování UV LED diod na hexakoptérech a kvadroptérech

Při nejvhodnějším rozložení se šesti diodami byl cíl detekován na vzdálenost 15 metrů a nižší.

⁶ Vlnová délka 395 nm se nachází na spodní hranici ultrafialového záření a viditelného světla

4.2.3. Výhody a nevýhody detekce UV LED značek

- + Bezpilotní systém je detekovatelný i v suboptimálních světelných podmínkách, např. tmavý bezpilotní systém letící před tmavým pozadím, např. lesem
- Nutnost pre-instalace externí infrastruktury, např. kamer zachytávajících pohyb nebo pozemní stanice RTK-GNSS
- Bezdrátová komunikace má omezený dosah a je náchylná k interferencím od nesouvisejících zdrojů, ale i od samotných bezpilotních systémů v případě velkého roje⁷
- Nízká robustnost systému; nutnost osazení všech bezpilotních systémů různých tvarů a velikostí LED pásy

⁷ Roj = anglický termín ‚swarm‘

5. Návrh požadavků na antikolizní systém pro zvolenou kategorii UAV

5.1. Úvod a specifikace testovacích bezpilotních systémů

Návrh požadavků na systém vychází primárně ze zkušeností týmu MRS, z proběhlých testů ve Spojených státech a v Evropě a je doplněn o vlastní inovativní řešení.

Návrh antikolizního zařízení bude pro stroje Ústavu letecké dopravy při FD ČVUT, konkrétně helikoptéry T-REX 500 od taiwanské společnosti Align, LAheli LA 700 od české společnosti a dron Phantom 4 od čínské DJI. Parametry strojů dává do souvislosti následující tabulka:

Tabulka 5 - specifikace bezpilotních systémů ÚLD

	Align T-REX 500 PRO	LAheli LA 700	DJI Phantom 4
Základní hmotnost (bez baterií)	1 210 g	1 800 g	918 g
Provozní hmotnost	2 551 g	5 572 g	1380 g
Max. vzletová hmotnost	4 000 g	14 000 g	1835 g
Nosnost (lift capability)	1 449 g	8 428 g	455 g
Kapacita baterií / napětí	2600 – 4600 mAh / jmenovité napětí 22,2 V	Jmenovité napětí 22,2 V	5350 mAh / 15,2 V
Doba letuschopnosti se zátěží – bez zátěže	3 – 10 min.	5 – 15 min.	28 min.

Z tabulky je patrné, že nejlehčím bezpilotním systémem z trojice je Phantom 4, který má třetinovou maximální vzletovou hmotnost oproti T-REX 500. Na druhou stranu disponuje Phantom 4 jako jediný slušně vybavenou kamerou upevněnou na pohyblivém kloubu, která je schopná záznamu videa s frekvencí až 120 snímků za sekundu v rozlišení FullHD.

5.2. Koncept antikolizního systému

Mým cílem je vytvoření konceptu ‚operation centric‘ kompaktního antikolizního modulu, který bude navržen na míru pro každý z ústavních strojů. Požadavky na systém jsou dle priorit následující, přičemž platí zároveň:

1. Spolehlivost detekce i v měnícím se prostředí
2. Nízká hmotnost
3. Nízký energetický odběr
4. Kompaktnost a integrovanost do celku

Systém by měl pracovat ve dvou rovinách, rozebraných v dalších subkapitolách:

- 1) Kooperativní detekce letadel s posádkou
 - a. Micro ADS-B transponder
- 2) Detekce překážek a neidentifikovatelných letadel
 - a. Relativní (vizuální) lokalizace
 - i. Analýza obrazu kamery
 - ii. LiDAR

5.2.1. Kooperativní detekce letadel s posádkou

S ohledem na vývojové trendy v civilní letecké dopravě je volba adekvátní komponenty pro kooperativní detekci letadel s posádkou jednoduchá. Jedná se o systém ADS-B, kterým budou v evropském vzdušném prostoru povinně vybavena všechna letadla s maximální vzletovou hmotností přesahující 5700 kg a cestovní rychlostí přesahující 250 kt. Konkrétně se nařízení týká na téměř 8. tisíc letadel a začne platit počínaje 7. červnem 2020.

Ve vzdušném prostoru Spojených států Amerických začne podobné nařízení platit již od počátku roku 2020 s tím rozdílem, že, se povinnost vztahuje na jednotlivé vzdušné prostory; tříd A, B, C. Ve zkratce se nařízení bude týkat většiny letadel pohybujících se nad 10 000 ft AMSL [29].

Varianty jak v Evropě tak USA mají jednu společnou věc; nařízení se týká pouze o ADS-B OUT, tedy schopnosti letounů vysílat přesná data o aktuální výšce, rychlosti, poloze a směru letounů a jejich identifikaci do okolí minimálně 100 NM. ADS-B IN funkce, která umožní data ostatních

letounů přijímat, zobrazovat je pilotům v kokpitu a předávat systému TCAS není zatím požadována. Nicméně, s výhledem do budoucna počítá většina aerolinek rovnou se zavedením ADS-B OUT/IN [29].

Na tyto chystané změny (= retrofitting) přirozeně zareagovali výrobci leteckých přístrojů jako např. Garmin, Rockwell Collins, Honeywell a další a zaplavili trh ADS-B přístroji. Žádná z těchto velkých firem však nenabízí micro ADS-B vhodné pro UAS. Příležitosti se naštěstí chopilo několik začínajících firem a zaplnily díru na trhu. Jedná se o amerického výrobce uAvionix a polského Aerobits.

Obě dvě firmy nabízejí srovnatelné kompaktní ADS-B transceiver (IN / OUT) disponující nízkou hmotností a spotřebou energie. Jejich parametry dává do souvislostí tabulka:

Tabulka 6 - srovnání dostupných ADS-B IN / OUT řešení vhodných pro UAS [30], [31]

	uAvionix ping 1090i	Aerobits TR-1W
Hmotnost	26 g	30 g
Energetický odběr	0,5 W / 6 – 14 V	1 W / 5 V /130 mA
Funkce	SBAS GPS + barometr	GNSS + barometr
Rozhraní	GDL 90 / MAVLink	AERO / MAVLink
Další výhody	Přímá integrace s autopilotem Pixhawk a DJI produkty	

5.2.2. Detekce překážek a neidentifikovatelných letadel

Hlavními výzvami pro antikolizní systém u „rekreačních“ strojů do 25 kg zůstávají: spolehlivá detekce překážek nízko u země a detekce letounů nevybavených ADS-B. V připravované legislativě se u těchto strojů počítá s pohybem do 400 ft AGL. V tomto prostoru vznikne zcela nový vzdušný prostor.

Možné What – If scénáře vyžadující relativní lokalizaci:

- Signál GNSS, na kterém je založen systém ADS-B, nebude dostupný
- Výpadek systému ADS-B
- Operace UAS uvnitř budov

- Manévrování mezi budovami, vyššími stromy, v okolí vedení vysokého napětí a dalších statických překážek
- Zamezení kolize s UAS nevybaveným ADS-B
- Zamezení kolize s letadlem nevybaveným ADS-B (v Evropě do MTOW 5700 kg)

V těchto a dalších případech je zapotřebí, aby antikolizní modul disponoval určitou formou nekooperativní relativní lokalizace.

K tomuto účelu využil tým MRS analýzu obrazu z kamery v konjunkci s laserovým měřičem, který mířil kolmo dolů a sloužil k určení přesné výšky nad terénem. Tento přístup zvolím v případě DJI Phantom 4, který má nosnost pouze 455 g a disponuje kamerou.

V případě helikoptér s vyšší nosností použiji jako relativní lokalizaci technologii LiDAR. LiDAR, Light Detection and Ranging, je aktivní metoda využívající odrazu pulzních laserových paprsků od zemského povrchu a měření času dopadu těchto paprsků zpět ke zdroji. Na rozdíl od fotogrametrie (relativní vizuální lokalizace) funguje LiDAR spolehlivě i za tmy a s nižšími výpočetními nároky [32].

Technologie LiDAR vyžaduje několik komponent [32]:

- Samotný přístroj LiDAR
- GNSS modul
- IMU = Inertial Measurement Unit aka INS = Inertial Navigation System (akcelerometr a gyroskop)
- Počítač pro zpracování dat

5.3. Implementace antikolizního modulu na ústavní UAS

T-REX 500 bude disponovat 5-ti zařízeními, LAheli LA 700 4-mi o maximálních rozměrech 10 x 10 x 4 cm. Obě helikoptéry mají snímatelný plastový aerodynamický kryt, pod kterým se nachází volný prostor.

Palubní počítač, který je nejtěžší, Pixhawk 4 autopilota a ADS-B umístím přednostně dovnitř kabiny, kvůli zachování těžiště. V případě T-REX 500 musí být kamera a laserový měřič umístěn pod trupem v ose hlavního rotoru.

V případě LAheli LA700 jediným přístrojem, který zůstane pod trupem je poměrně těžký LiDAR. Určitě dojde ke značnému posunutí těžiště směrem dolů a bude zapotřebí vertikálně navýšit výšku lyžin. Druhá možnost zahrnuje trvalé sundání ochranného krytu a umístění LiDARu do kokpitu.

DJI Phantom 4 bude osazen pouze velmi drobným ADS-B zařízením, které přilepí na spodní stranu trupu za kameru, nebo dovnitř těla stroje.

5.3.1. Align T-REX 500 Pro



Obrázek 11 - helikoptéra Align T-REX 500 [33]

Při návrhu modulu budu U T-REX 500 primárně limitován nízkou nosností, která činí pouhých 1449 g. Jmenovité napětí baterií je 22,2 V.

5.3.1.1. ADS-B

S ohledem na nízkou kapacitu baterií a krátkou dobu letu jako ADS-B řešení zvolím uAvionix ping 1090i s poloviční spotřebou oproti polskému produktu; 0,5 W / 6 – 14 V.



Obrázek 12 - micro ADS-B uAvionix ping 1090i [30]

5.3.1.2. LiDAR

Ačkoli je na trhu dostupných mnoho řešení, žádné není vhodné buď kvůli příliš vysoké váze, nebo nevyhovujících ostatních parametrech. Např. Leddar Vu8 se 128,5 g splňuje s přehledem hmotností limit a horizontální FOV o 99 ° pro dopřednou detekci překážek, nicméně vertikální FOV o rozsahu 3,3 ° a dosah detekce pouhých 34 metrů nejsou dostačující [34].

Druhé nejlehčí zařízení Velodyne LiDAR ULTRA Puck s 925 g a vysokým rozsahem FoV 360 ° H / 40 ° V [35] se společně s PC o hmotnosti 0,9 kg také nevejde do limitu nosnosti helikoptéry.

5.3.1.3. Relativní vizuální lokalizace

K zachycení obrazu jsem zvolil adekvátní set kamery + objektivu Mobius Maxi ActionCam o hmotnosti 52 g včetně integrované baterie. Kamera zvládne zachytit obraz až o rozlišení 2,7 K při 30 snímcích za sekundu, nicméně pro účely zpracování obrazu a s ohledem na výkon 1-2 jader palubního počítače (zbylá budou použita pro výpočty polohy) bude dostačující rozlišení 720p při 60 fps, které lze v případě vyšších výpočetních nároků snížit na 30 fps, nebo v případě rezervy zvýšit na 100 či 120 fps. Kamera posílá data přes rozhraní USB 2.0.



Obrázek 13 - Mobius Maxi ActionCam [47]

5.3.1.4. *Palubní počítač*

Pro výpočty a zpracování dat ze senzorů s rezervou poslouží Intel NUC 8 kapesní počítač o rozměrech 10 x 10 cm a hmotnosti necelých 0,9 kg. Od soutěže MBZIRC 2017 uběhly dva roky a za ten čas postoupil vývoj procesorů Intel o 3 generace, což pro naše použití přináší vyšší výkon a nižší spotřebu, u modelu NUC8I7INH konkrétně 19 V / max. 90 W [36].

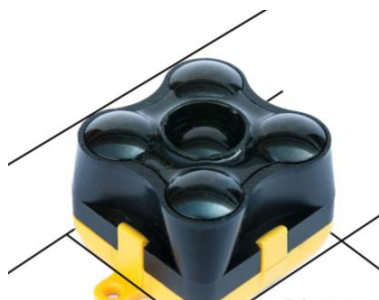
PC je osazen čtyřjádrovým procesorem Intel i7-8565U na 1,8 Ghz, 8 GB RAM, grafickou kartou AMD Radeon 540X a disponuje 6-ti vstupy USB a bezdrátovou WiFi a Bluetooth [36].



Obrázek 14 – kapesní počítač Intel NUC8I7INH [36]

5.3.1.5. *Laserový měřič*

V případě nedostupnosti systému GPS je s absencí LiDARu je nutné změřit výšku AGL jiným způsobem. K tomu jsem zvolil laserový měřič Terabee TeraRanger Evo 60 m. Z názvu je patrné dosah laseru 60 m. Se základnou 3 x 3 cm je laser miniaturní a má hmotnost pouhých 12 g. Napájení zajišťuje rozhraní USB 2.0 [37].



Obrázek 15 - laserový senzor Terabee TeraRanger Evo 60 m

5.3.1.6. Pixhawk 4 autopilot

System zastřešuje ověřené Pixhawk 4 rozhraní s hmotností pouhých 15,8 g. Zařízení disponuje akcelerometrem, gyroskopem, magnetometrem, barometrem a GPS/GLONASS přijímačem a je napájené ze vstupu USB [38]. Do budoucna umožní upgrade modulu vyhovujícím LiDARem.



Obrázek 16 - schéma vstupů / výstupů autopilota Pixhawk 4 [38]

5.3.2. LAheli LA 700



Obrázek 17 - helikoptéra LAheli LA700 [39]

LAheli LA 700 od české firmy je helikoptéra s výrazným výkonnostním přebytkem a velkorysou nosností 8428 g (helikoptéra s rezervou unes jednou sama sebe), která mi umožní návrh kompletního modulu disponujícího LiDARem.

5.3.2.1. ADS-B

Vzhledem k převažujícím výhodám amerického produktu jej preferuji před polským řešením. Modul tedy osadím uAvionix ping 1090i.

5.3.2.2. LiDAR

Řešení v oblasti LiDARu je nespočet. Proto jsem určil rozhodující parametry, kterými jsou nízká hmotnost, nízká spotřeba a široký rozsah záběru (FOV – field of view). Tímto filtrem pak z nepřeberného množství výrobků prošel jeden produkt.

První je model Riegl miniVUX-1UAV od švýcarského výrobce. Disponuje ve své třídě nízkou hmotností, vysokým výkonem a nepřekonaným FOV pro zvýšení situačního povědomí [40].

Vybrané parametry uvádím v tabulce:

Tabulka 7 - - parametry Riegl mini VUX-1UAV [40]

	Riegl miniVUX-1UAV
Hmotnost	1,6 kg
Spotřeba	16 W / 11 – 32 V
FOV	360 ° H / 90 ° V
Dosah	250 m
Přesnost	15 / 10 mm
Max. Frekvence snímání	100 Hz
Výbava	Příprava na IMU modul GNSS



Obrázek 18 - Riegl miniVUX-1UAV

5.3.2.3. *Palubní počítač*

Výpočetní výkon dodá stejný počítač, Intel NUC8I7INH

5.3.2.4. *Pixhawk 4 autopilot*

System zastřešuje stejný autopilot, Pixhawk 4.

5.3.3. DJI Phantom 4



Obrázek 19 - kvadroptéra DJI Phantom 4 s dedikovanou kamerou [41]

Z dostupných bezpilotních systémů je DJI Phantom nejvíce komerční stroj a zároveň disponuje přímo od výrobce dvěma kamerami na tříosém stabilizačním kloubu; jednu směřující dopředu a druhou dolů. Dopředná kamera pokrývá jehlanovitý prostor o 60° v horizontálním a 54° ve vertikálním směru. Kamera směřující dolů pokrývá jehlan o 140° v předozadním směru a 100° ve směru do stran. Výrobce do stroje zakomponoval vlastní antikolizní systém založený na relativní vizuální lokalizaci; ‚DJI Vision Positioning System‘ [41].

5.3.3.1. ADS-B

Díky deklarované kompatibilitě od výrobce bude integrace uAvionix ping 1090i bezproblémová. Nebude tak zapotřebí ani palubní počítač, ani Pixhawk 4 autopilot jako u předchozích konfigurací.

5.3.3.2. LiDAR

Stejně jako u T-REX 500 neexistuje spolehlivé řešení, které by tento stroj unesl.

5.4. Diskuse a závěr

Mojí hlavní prioritou při psaní této práce bylo se nejdříve zorientovat ve velmi dynamickém světě bezpilotních systémů. Chtěl jsem získat přehled o mezinárodních projektech a problematice spojené s integrací bezpilotních systémů do vzdušného prostoru. Z toho důvodu jsem načel velké množství zdrojů, primárně v angličtině, a pokusil jsem se co nejvěcněji zachytit aktuální dění v této oblasti na mezinárodním poli.

Měl jsem tu čest sledovat úspěch týmu Martina Sasky z oddělení MRS a čtením pronikat do složitostí problematiky, kdy jsem si uvědomil, kolik týdnů a měsíců úsilí tento nepochybný úspěch stál. Velmi jsem přitom oceňoval popis problémů, na které tým při testování narazil a které překonal.

Ze všech těchto poznatků jsem vycházel při návrhu inovovaného konceptu antikolizního modulu, kterým bych vylepšil situační povědomí bezpilotních systémů pocházejících z našeho ústavu, ale i odjinud. Snažil jsem se vytvořit kompatibilní, přímočarý, spolehlivý a do jednotného celku integrovaný modulární koncept. V mé práci jsem se soustředil na hardwarovou stránku, ve které se orientuji lépe než v programování systému.

Vidím velký prostor práci dotáhnout do konce reálným zapojením a otestováním na některém bezpilotním systému.

V neposlední řadě bohužel došlo k nedorozumění a ústav disponuje modelem DJI Phantom 3, zatímco já jsem navrhl modul pro mírně odlišný model Phantom 4.

Seznam literatury

- [1] *Introduction to TCAS II: Version 7.1* [online]. In: . USA, 2018, s. 50 [cit. 2018-11-23].
- [2] What is the difference between TCAS and ACAS?. In: *Eurocontrol* [online]. Europe, 2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/faq/what-difference-between-tcas-and-acas>
- [3] Integrated TCAS solutions. In: *Rockwell Collins* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://www.rockwellcollins.com/-/media/images/rc2016/products-and-services/corporate/traffic-avoidance-1920x1080.jpg?bc=white&as=0&h=720&la=en&w=1280&lastupdate=20170824152412&hash=b29f326c7325ddddd93989ac23745b7d2154291e3>
- [4] WHERE IS ADS-B OUT REQUIRED?. *AOPA: Your freedom to fly* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/ads-b/where-is-ads-b-out-required>
- [5] *Single European Sky ATM Research Joint Undertaking: High performing aviation for Europe* [online]. Cologne, Germany: EU, 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sesarju.eu/>
- [6] NASA Flight Tests New ADS-B Device on Ikhana UAS. In: *NASA* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/ads-b_tested_on_ikhana.html
- [7] Co je to bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, model letadla?. *Úřad pro civilní letectví* [online]. ČR, 2018 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla>
- [8] NOVÁK, Vítek. Předpisy pro létání s drony v ČR. *Droneweb* [online]. 2017 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/37-predpisy-pro-letani-s-drony-v-cr>
- [9] ČESKÁ REPUBLIKA. Doplněk X - Bepilotní systémy. In: *Předpis L2*. ČR: Ministerstvo dopravy ČR, 2014, ročník 2014, čj. 153/2014-220. Dostupné také z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [10] Mapa rozdělení vzdušného prostoru ČR. In: *LAA ČR* [online]. 2018 [cit. 2018-08-21]. Dostupné z: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/rozdeleni-vp/Pilot%20LAA%20C4%8CR%20-%20C5%99ez%20vzdu%20C5%A1n%C3%BDm%20prostorem%202018.jpg>
- [11] AisView: 3.6. *Řízení letového provozu České republiky* [online]. Jeneč, 2018 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <http://aisview.rlp.cz/?lang=en>
- [12] Opinion No 01/2018: Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft systems in the 'open' and 'specific' categories. In: *European Union Aviation Safety Agency* [online]. Cologne, Germany: EASA, 2019 [cit. 2019-05-16].

- Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2001-2018.pdf>
- [13] EASA certifies new "Autopilot/Flight Director" TCAS mode for A380: Enhancing flight safety during TCAS manoeuvres. In: *Airbus* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2009/08/easa-certifies-new-autopilot-flight-director-tcas-mode-for-a380.html>
- [14] CORNING, Jonathan, Li DING, Nick MILLER, H. BARLETT, Roger SCHAUFLELE, Thomas MAROTTA, Michael LUKACS a Dipasis BHADRA. *FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2018-2038*. United States: FAA, 2018. Dostupné také z: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2018-38_FAA_Aerospace_Forecast.pdf
- [15] BLAKE, Tiffany, ed. Unmanned Aircraft System Traffic Management: NASA's working to make low-flying air traffic safe. In: *NASA* [online]. 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/ames/utm>
- [16] BOYLE, Angela. *Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM): Enabling Civilian Low-altitude Airspace and Unmanned Aircraft System Operations* [online]. In: . 2018 [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml>
- [17] SHEPARDSON, David. U.S. proposes to allow drone operation at night, over people. In: *REUTERS* [online]. United States: Reuters, 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.reuters.com/article/us-usa-drones/u-s-proposes-to-allow-drone-operation-at-night-over-people-idUSKCN1P828W?feedType=RSS&feedName=technologyNews&utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+reuters%2FtechnologyNews+%28Reuters+Technology+News%29
- [18] BEHAR, Michael. Drones in a Busy Sky: Can technology protect airplanes from the new threat?. *Air & Space Magazine* [online]. 2016 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://www.airspacemag.com/flight-today/drone-tests-180960069/>
- [19] Program SESAR. *Řízení letového provozu České republiky* [online]. Jeneč: ŘLP ČR, s. p., 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/tisk/Stranky/Program-SESAR-Deployment.aspx>
- [20] Sdružení firem AirMap / UpVision zvítězilo v tendru na poskytování služby řízení bezpilotního letového provozu pro řízený vzdušný prostor v České republice. In: *Air Navigation Services of the Czech Republic* [online]. Jeneč, Czech Republic, 2018 [cit. 2018-08-20]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/tisk/tiskzpravy/Stranky/Sdru%C5%BEen%C3%AD-firem-AirMap--UpVision-zv%C3%ADt%C4%9Bzilo-v-tendru.aspx>
- [21] *UAV Aliance pro bezpilotní letecký průmysl: sdružení výrobců, provozovatelů bezpilotních letadel* [online]. 2018 [cit. 2018-08-22]. Dostupné z: <https://uavaliance.cz/>

- [22] Important progress has been achieved within the MIDCAS project. In: *SAAB* [online]. 2015 [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <https://saabgroup.com/media/stories/stories-listing/2015-05/midcas-project/>
- [23] ROBINSON, Tim. Unlocking European skies for UAVs. *Royal Aeronautical Society: Advancing aerospace and aviation across the globe* [online]. b.r. [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <https://www.aerosociety.com/news/unlocking-european-skies-for-uavs/>
- [24] *Multi-robot Systems: Czech Technical University in Prague* [online]. Prague: Multi-robot Systems, 2018 [cit. 2018-08-23]. Dostupné z: <http://mrs.felk.cvut.cz/>
- [25] SPURNÝ, Vojtěch, Tomáš BÁČA, Martin SASKA et al. *Cooperative Autonomous Search, Grasping and Delivering in a Treasure Hunt Scenario by a Team of UAVs* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [26] ŠTĚPÁN, Petr, Tomáš KRAJNÍK, Matěj PETRLÍK a Martin SASKA. *Vision techniques for on-board detection, following and mapping of moving targets* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [27] BÁČA, Tomáš, Daniel HERT, Giuseppe LOIANNO, Martin SASKA a Vijay KUMAR. *Model Predictive Trajectory Tracking and Collision Avoidance for Reliable Outdoor Deployment of Unmanned Aerial Vehicles* [online]. 2018 [cit. 2018-08-16].
- [28] WALTER, Viktor, Martin SASKA a Antonio FRANCHI. Fast Mutual Relative Localization of UAVs Using Ultraviolet LED Markers. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS 2018)* [online]. 2018. Dallax, TX, United States, 2018, June 27, 2018 [cit. 2018-08-16]. hal-01814828, version 1. Dostupné z: <https://hal.laas.fr/hal-01814828>
- [29] BELLAMY, Woodrow. European Operators, Regulators Working on New ADS-B Implementation Plan: Retrofitting the European fleet in time is “just impossible at this point.” Regulators have a plan to address that — including an exemption policy. *Avionics International* [online]. 2019, **2019** [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <http://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/march-2019/european-operators-regulators-working-on-new-ads-b-implementation-plan/>
- [30] UAvionix ping 1090i: PING-1090i ADS-B Transceiver. In: *UAvionix* [online]. USA: uAvionix, 2019 [cit. 2019-08-25]. Dostupné z: <https://uavionix.com/downloads/ping1090/docs/uAvionix-ping1090i-ADS-B-Transceiver-Data-Sheet.pdf>
- [31] Aerobits TR-1W: 1 Watt ADS-B Transceiver. In: *Aerobits* [online]. Poland: Aerobits, 2019 [cit. 2019-08-25]. Dostupné z: http://aerobits.pl/images/Products_page/Wsady/Technical_Documentation_Datasheet_TR-1W.pdf
- [32] Understanding LiDAR. *Phoenix LiDAR Systems* [online]. USA: Phoenix LiDAR Systems, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.phoenixlidar.com/lidar-mapping-principles/>

- [33] Alan Szabo Jr. ALIGN Trex 500 DFC RCX Show 6/1/2013. In: *YouTube* [online]. United States: Google, 2013 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-us0a6knAKA>
- [34] Leddar Vu8. In: *LeddarTech* [online]. USA: LeddarTech, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://d2euypccftd53r.cloudfront.net/prod/app/uploads/2018/04/21135401/Spec-Sheet-Leddar-Vu8-20190618-EN.pdf>
- [35] Velodyne LiDAR. In: *Velodyne Lidar* [online]. USA: Velodyne Lidar, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://go.pardot.com/l/208822/2018-02-23/6t1jp?File_Name=DataSheetUltraPuck&File_Code=DataSheetUltraPuck
- [36] Intel NUC 8 Mainstream: NUC8i7INH Desktop Computer. *Walmart* [online]. USA: Walmart, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.walmart.com/ip/Intel-NUC-8-Mainstream-G-NUC8i7INH-Desktop-Computer-Intel-Core-i7-8565U-8GB-RAM-AMD-Radeon-540X-Windows-10-Home/984958214>
- [37] TeraRanger Evo 60 m. In: *Terabee* [online]. France: Terabee, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.terabee.com/wp-content/uploads/2019/03/TeraRanger-Evo-60m-Specification-sheet.pdf>
- [38] Pixhawk 4. *Dronecode* [online]. USA: PX4 Dev Team, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html
- [39] LA700. In: *RC portal* [online]. Slovensko: rcportal.sk, 2019 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <https://www.rcportal.sk/zmensi-max/200/200/upload/1341304799-4510.jpg>
- [40] RIEGL miniVUX-1UAV. In: *RIEGL USA* [online]. USA: Riegl, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <http://www.rieglusa.com/pdf/minivux-1uav-datasheet.pdf>
- [41] DJI Phantom 4. In: *Drone Traveller* [online]. Germany: Bina and Francis, 2018 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: https://drone-traveller.com/wp-content/uploads/DJI-Phantom-4-Advanced-Pro_Test.jpg
- [42] BORS, Mátyás. What is a Finite State Machine?. *Medium* [online]. 2018 [cit. 2018-09-14]. Dostupné z: <https://medium.com/@mlbors/what-is-a-finite-state-machine-6d8dec727e2c>
- [43] CASA C 212 Aviocar. In: *Alchetron* [online]. USA: Alchetron, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <https://alchetron.com/CASA-C-212-Aviocar#demo>
- [44] Dassault Falcon 20. In: *Wikipedia* [online]. USA: Wikipedia, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault_Falcon_20#/media/File:A_IRIAF_Dassault_Falco_n_20_lands_at_Mehrabad_Airport.jpg
- [45] Sky-Y, UAV by Alenia. In: *Robotics news* [online]. USA: velocityfarm, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://robotpig.net/_images/posts/sky-y_3.jpg
- [46] This Cockpit Video Of Bulgaria's Two-Ship C-27J Spartan Demo Is Intense. In: *Jalopnik* [online]. USA: Gizmodo Media Group, 2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z:

<https://foxtrotalpha.jalopnik.com/this-cockpit-video-of-bulgarias-two-ship-c-27j-spartan-1740238257>

- [47] Mobius Maxi ActionCam Camera Packages!!. *Mobius ActionCam* [online]. USA: Wordpress, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://www.mobius-actioncam.com/mobius-maxi/>