



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

**ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI
FAILSAFE SYSTÉMU
BEZPILOTNÍHO LETADLA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor diplomové práce: Bc. Adam Kleczatský

Vedoucí diplomové práce: Ing. Šárka Hulínská

Praha, 2019



K621 **Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Adam Kleczatský

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Analýza spolehlivosti failsafe systému bezpilotního letadla**

Název tématu (anglicky): Reliability Analysis of the Unmanned Aircraft's Fail-safe System

Zásady pro vypracování

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

- Současný stav legislativy v oblasti bezpilotních letadel
- Harmonizace evropské legislativy týkající se provozu bezpilotních letadel
- Failsafe systém
- Provedení experimentu ověření failsafe systému a vyhodnocení dat
- Vytvoření interaktivního nástroje pro kvantifikace rizik v oblasti UAS
- Shrnutí vlastního přínosu práce



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: NPA 2017-05 (B): Introduction of a regulatory framework for the operation of drones. EASA, 2017.
JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA). 1. JARUS, 2017.
EU-STS: Standard scenarios for operations of UAS in the specific category. EASA, 2018.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Šárka Hulínská**

Datum zadání diplomové práce: **27. července 2018**
(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 diplomové práce: **28. května 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 diplomové práce.

Bc. Adam Kleczatský
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....27. července 2018

Poděkování

Poděkování za podporu při studiu patří celé mé rodině v čele s mými rodiči. Poděkování za cenné rady a poskytnutou pomoc bych tímto rád vyjádřil kolegům a přátelům jak z provozní, tak vědecké sféry.

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užívání 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).

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.

V Praze dne 27. května 2019



Bc. Adam Kleczatský

Abstrakt

Diplomová práce pomocí praktického experimentu ověřuje spolehlivost systému failsafe bezpilotního letadla na základě změřených dat a jejich vyhodnocení. V rámci praktické části hodnotí měřené parametry, které jsou svou povahou zásadní pro vyhodnocení a vytváří ucelený pohled na celkovou spolehlivost letadlového systému. Práce deklaruje, že při zachování určitých bezpečnostních opatření je současná provozní spolehlivost bezpilotního letadla, resp. jeho systému, jež byl předmětem experimentu, na velké úrovni. Zároveň předkládá parametry, jejichž existence v provozním prostředí celkovou spolehlivost snižuje a mají přímý dopad na konečnou bezpečnost letu. V tomto ohledu také práce obsahuje analýzu rizik, k jejichž identifikaci došlo během experimentu. Identifikovaná rizika jsou kvantifikována a také je za těmito účely vytvořen interaktivní nástroj pro kvantifikaci rizik v oblasti bezpilotního létání, s potenciálem pro volné užití leteckou veřejností.

Klíčová slova

bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, failsafe systém, spolehlivost, riziko

Abstract

The diploma thesis makes use of a practical experiment to verify reliability of an unmanned aircraft failsafe system based on measured data and their evaluation. The practical part assesses the measured parameters, which by their nature are essential for evaluation, and creates a comprehensive view of overall reliability of the aircraft system. The work declares that while maintaining certain security measures, the current operational reliability of the unmanned aircraft or its system, which was the subject of the experiment, at a high level. At the same time the thesis presents parameters the existence of which in the operating environment reduces overall reliability and has a direct impact on final flight safety. In this respect, the work also includes an analysis of the risks identified during the experiment. The identified risks are quantified and an interactive tool for quantifying risks in the field of unmanned flying, with a potential for free use by the airline, is also created for these purposes.

Key Words

unmanned aircraft, unmanned aerial system, failsafe system, reliability, risk

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Legislativa.....	12
2.1	Terminologie.....	13
2.2	Doplněk X.....	14
2.3	Řízení bezpečnosti a spolehlivost.....	17
2.4	Současný stav provozu.....	20
3	Harmonizovaná legislativa UAS.....	23
3.1	Aktuální stav regulačního rámce.....	23
3.2	Budoucí kategorizace provozu UAS	24
3.2.1	Otevřená kategorie (Open)	24
3.2.2	Specifická kategorie (Specific).....	26
3.2.3	Certifikovaná kategorie (Certified).....	26
3.3	Další legislativní kroky	27
4	Failsafe systém.....	28
4.1	Legislativní rámec.....	28
4.2	DJI Return-to-Home.....	29
5	Experiment	32
5.1	Technická specifikace letadla	32
5.2	Modelová situace.....	33
5.3	Měřené veličiny.....	35
5.4	Letadlo jako systém	37
6	Vyhodnocení dat a analýza rizik	38
6.1	Interpretace naměřených dat	38
6.1.1	Let č. 71, 76 a 77	38
6.1.2	Přesnost	39
6.2	Analýza rizik	43

6.2.1	Napájení	44
6.2.2	Systém řízení letu	46
6.2.3	Osoby a prostředky zapojené do provozu.....	49
6.2.4	Počasí	53
6.3	Diskuze vyhodnocených rizik.....	56
6.4	Celková spolehlivost letadla.....	60
7	Interaktivní nástroj kvantifikace rizik.....	62
7.1	Popis programu	63
8	Závěr	66
	Zdroje	68
	Seznam obrázků a tabulek	72
	Přílohy	73
	Příloha 1: záznamový list externích měření	73
	Příloha 2: ukázka části konvertovaného výstupu z telemetrie letadla	75
	Příloha 3: tabulka identifikovaných rizik.....	76
	Příloha 4: kód MATLAB rozhraní	77

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Český název
	Anglický název
3D	Trojdimenzionální prostor
	Three-dimensional space
AAAM	-
	Association for the Advancement of Automotive Medicine
AFIS	Letištní letová a informační služba
	Aerodrome Flight Information Service
AGL	Výška nad zemí
	Above ground level
AIS	-
	Abbreviated Injury Scale
AMC	Přijatelné způsoby průkazu
	Acceptable Means of Compliance
AMSL	Nadmořská výška (výška nad střední hladinou moře)
	Above mean sea level
AP	Autopilot
	Autopilot
ARP	Vztažný bod letiště
	Airport (aerodrome) reference point
ATM/ANS	Služby řízení letového provozu / Letecké navigační služby
	Air Traffic Management / Air Navigation Services
ATTI	-
	Attitude mode
ATZ	Letištní provozní zóna
	Aerodrome Traffic Zone
BVLOS	Bez přímého dohledu
	Behing Visual Line of Sight
CE	-
	Conformité Européenne

CMOS	-
	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Centrální procesorová jednotka
	Central Processing Unit
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
	Czech Hydrometeorological Institute
ČR	Česká republika
	Czech Republic
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
	-
DJI	-
	Dà-Jiāng Innovations
EU	Evropská unie
	European Union
FCC	Federální komise pro spojení
	Federal Communications Commission
FPV	-
	First-person view
GLONASS	Globální družicový polohový systém
	Global Navigation Satellite System
GM	Poradenský materiál
	Guidance Material
GPS	Globální polohový systém
	Global Positioning System
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
	International Civil Aviation Organization
ID	Identifikace
	Identification
IMU	-
	Inertial Measurement Unit
LAT	Zeměpisná šířka
	Latitude

LED	Elektroluminiscenční dioda
	Light-Emitting Diode
LiPo	Lithium-polymerový akumulátor
	Lithium polymer battery
LK(P),(R),(D)	Prostor (zakázaný), (omezený), (nebezpečný)
	Area (Prohibited), (Restricted), (Dangerous)
LON	Zeměpisná délka
	Longitude
(M)CTR	(Vojenský) Řízený okrsek
	(Military) Control Zone
MD	Ministerstvo dopravy
	Ministry of Transport
MTOM(W)	Maximální vzletová hmotnost
	Maximum Takeoff Mass (Weight)
NPA	Oznámení o navrhované změně
	Notice of Proposed Amendment
OSD	Zobrazovací monitor
	On Screen Display
PoF	Pravděpodobnost zranění
	Probability of Failure
RC	Dálkově řízený
	Radio Controlled
RMZ	Oblast s povinným radiovým spojením
	Radio Mandatory Zone
RPA(S)	Dálkově řízené letadlo (-vý systém)
	Remotly piloted aircraft (system)
RPASP	-
	Remotely Piloted Aircraft Systems Panel
RTH	Návrat na místo vzletu
	Return-to-Home
ŘLP	Řízení letového provozu
	Air Navigation Services

SMS(M)	Systém (manuál) řízení provozní bezpečnosti
	Safety Management System (Manual)
SORA	-
	Specific Operations Risk Assessment
STS	Standardní scénáře
	Standard Scenarios
TRA	Dočasně vymezený prostor
	Temporary Reserved Area
TSA	Dočasně vyhrazený prostor
	Temporary Segregated Area
UA	Bezpilotní letadlo
	Unmanned Aircraft
UAS	Bezpilotní systém
	Unmanned Aerial/Aircraft System
UAV	Bezpilotní prostředek
	Unmanned Aerial/Aircraft Vehicle
USA	Spojené státy americké
	United States of America
UTM	Řízení letového provozu letadel bez pilota na palubě
	Unmanned Aircraft Traffic Management System
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
	Civil Aviation Authority
ÚZPLN	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod
	Air Accidents Investigation Institute (AAIL)
VLOS	Pod přímým kontaktem
	Visual line of sight
VPS	Vizuální polohovací systém
	Visual Positioning System
Wi-Fi	-
	-

1 Úvod

Letecká doprava je jedním z nejmladších druhů doprav obecně. Přes bájně letce a první přelety Atlantiku jsme se překlenuli do epochy, která dramaticky zvyšuje počet strojů, které ve zvětšující se míře zahušťují vzdušný prostor jednotlivých území. V rámci pohledů na tento růst můžeme sledovat mnoho pozitivních doprovodných jevů, které jsou přirozeným a spojitým procesem letectví, jakožto faktoru globalizačního procesu. Silné interakce letectví s demografií, ekonomikou a politikou umožňují současné společnosti efektivněji fungovat v rámci globálních celků, předně však stojí za rozvojem lidské společnosti a člověka samotného.

V souvislosti s globálním nárůstem provozu na leteckých dopravních cestách však sledujeme také negativní jevy. Tyto jevy plynou především ze závislosti velikosti provozu na jednotlivých nárocích v oblasti bezpečnosti dopravní procesů. Každým rokem se zvyšující objem pohybů letadel ve vzdušném prostoru s sebou přináší vysoké nároky na bezpečnost a také technologie, které k její dostatečné úrovni napomáhají. Zajištění bezpečnosti v letectví je v současné době jednou z priorit, která je přenášena na všechny zúčastněné strany v dopravě. V oblasti bezpečnosti obecně musíme rozlišit dva druhy definice výrazu, pro který český jazyk, na rozdíl od anglického, disponuje pouze jedním slovem. V případě anglického „safety“ definujeme bezpečnost provozní, tedy bezpečnost, kterou ohrožují rizika, nacházející se uvnitř systému. Naopak „security“ označuje bezpečnost, kterou narušují vnější vlivy, běžně protiprávní činy. V komplexním pohledu na obě definice, v českém jazyce jediného slova, bezpečnosti, sledujeme klady a zápory, plynoucí z povahy, jakou popisují.

Zodpovědnost za provozní bezpečnost v letecké dopravě je prostřednictvím právních úprav přenášena na regulátory, zaměstnavatele, zaměstnance a konečně spotřebitele. Zvyšování (nejen provozní) bezpečnosti je však od 40. let 20. století hlavním cílem národních a nadnárodních organizací v letectví. Cíle těchto organizací vždy reagují na trendy a poptávku v bezpečnostním inženýrství. Napříč dekádami bylo vyvinuto několik přístupů k bezpečnosti a i v současnosti dochází k neustálým aktualizacím, změnám a výňatkům v předpisech pro provoz.

Definicí základního principu fungování letadel, která jsou řízena na dálku, vzniká spousta právních ale také etických otázek společenské odpovědnosti provozu. Pilot těchto zařízení není zúčastněn do takové míry, jak tomu je u posádek klasických pilotovaných letadel. V této spojitosti vzniká minimálně subjektivní pocit poklesu zodpovědnosti za provoz. Pilot bezpilotního systému je sice účastník letového provozu stejně tak, jako osádka dopravních

letadel, avšak jeho situování na zemi a pilotování, jež je realizováno dálkovým přenosem pokynů ze země, mu v případě neočekávané poruchy, vedoucí k letecké nehodě, s velkou mírou pravděpodobnosti způsobí spíše materiální škody nežli újmu na zdraví. Ve spojitosti s dostupností těchto technologií a výše zmíněným přirozeným poklesem odpovědnosti nejen ve vztahu k sobě, ale také okolnímu provozu, je třeba nejen procesně, ale také technicky regulovat a tvořit základní pravidla pro provoz těchto zařízení.

Technická opatření jsou v tomto ohledu dnes již plně integrována i v těch uživatelsky nejdostupnějších letadlech. Běžně hovoříme o systémech bezpečnostní architektury výrobku, které v případě nežádoucí události v provozu zamezí škodám na zdraví a majetku. Výrobci letadel tyto systémy vyvíjí nejen pro ochranu konstrukce před působením vnějších fyzikálních sil, nesprávnou manipulací s jejich produktem a dalším nepříznivým vlivům, ale také ochranu rozhraní určeného pro pilotáž. Pokud se zaměříme na bezpilotní systém jako komplexní celek – tedy člověk, rozhraní, letadlo, je důležité zajistit přenos informace mezi všemi prvky v každé fázi letu (vyjma autonomních systémů). Vzhledem k fyzikálním charakteristikám přenosu signálu je možné, že během cyklu provozu letadla bez pilota na palubě dojde k situacím, kdy bude signál ztracen a pilot ztratí jeho přímou kontrolu. Pro tyto situace jsou do letadel instalovány systémy failsafe, které v případě nastání situace výše zmíněné snižují či zcela eliminují negativní následky výpadku.

Cílem této práce je experimentálně zhodnotit spolehlivost failsafe systému konkrétního bezpilotního letadla. Spolehlivost je uvažována jako plnění správné funkce. Na základě změřených dat dojde rovněž k hodnocení rizik, která byla identifikována díky realizaci vyhodnocení praktické části (letové činnosti) a jsou spojena s provozem bezpilotního letadla. Pro eventuální další využití výsledků práce je také cílem vytvořit interaktivní nástroj pro práci s riziky, především pro amatérské uživatele těchto prostředků, za účely zlepšení bezpečnosti provozního prostředí a bezpečnosti prováděných letů ve vzdušném prostoru České republiky.

2 Legislativa

Cílem této kapitoly je v rámci legislativního pozadí seznámit čtenáře jak s terminologií s bezpilotními prostředky spojenou, současným stavem provozního prostředí nebo kontextem, se kterým závazná pravidla vznikala a se kterými se počítá v budoucím vývoji. V kapitole bude rovněž popsána jedna z metodik pro řízení bezpečnosti v oblasti bezpilotních prostředků, která je také úzce spjata s legislativní normou.

Smyslem regulace obecně je dávat závazné příkazy k zavedení a udržování žádoucího pořádku. Pokud jde o oblast letecké dopravy, regulatorní opatření mají tři úrovně: národní, bilaterální či plurilaterální. Jde o regulaci tuzemských (národních) a zahraničních právnických osob a fyzických osob působících v civilním letectví, která je prováděna státem při výkonu jeho práva suverenity nad územím a vzdušným prostorem státu. Proto musí brát v úvahu také mezinárodní závazky státu a dále to, jak se národní regulace dotkne jiných států (tzv. exteritoriální dopady národní regulace). Celkově lze říci, že s postupným přechodem letecké dopravy na pravidla volného trhu rozsah využívání regulace postupně klesá. Tento trend je však závislý na geografických oblastech a politickém a ekonomickém uspořádání státu. Naopak roste potřeba v oblasti ekonomické regulace u privatizovaných částí letecké infrastruktury, používajících plný nebo částečný přirozený monopol, stejně jako důležitost regulace v oblasti provozní, technické a bezpečnostní. (1) Oblast bezpilotního létání tedy není právně upravována pouze v rámci tuzemských předpisů. Aplikujeme rovněž mezinárodní úmluvy a zákony tak, jako v konvenčním letectví pilotovaných letadel. Základním pilířem práva je tak Chicagská úmluva z roku 1944 (platná od 4. dubna 1974), která v článku 8 deklaruje, že žádné letadlo způsobilé k řízení bez pilota na palubě, nesmí létat bez pilota nad územím smluvního státu bez určitého typu povolení, s přesnými podmínkami, za jakých má být tento let prováděn a se souhlasem obou stran. Každý smluvní stát pak musí zajistit, aby let v oblasti řízeného letového provozu, v němž dochází k provozu letadel, byl řízen tak, aby nedošlo k ohrožení provozu tohoto civilního letectví. (2) V rámci mezinárodní spolupráce došlo k výraznému posunu v regulaci na 169. zasedání Aeronavigační komise ICAO (International Civil Aviation Organization, dále jen „ICAO“), konající se v roce 2011, která analyzovala potenciál této organizace v oblasti regulace bezpilotních systémů. Později v tomtéž roce vyšel oběžník číslo 328 „Unmanned Aircraft Systems (UAS)“. Jeho úkolem bylo definovat vizi rozvoje těchto progresivních prostředků a zároveň jejich integrace do jednotného vzdušného prostoru. Hlavní pramen pro výklad práva spojeného s bezpilotním létáním v České republice nacházíme v § 52 Létání letadel bez pilota, zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví (dále jen „letecký zákon“). Tento paragraf deklaruje, že letadlo způsobilé létat bez pilota na palubě může

létat nad územím České republiky jen na základě povolení vydaného Úřadem pro civilní letectví (dále jen „ÚCL“) a za podmínek v tomto povolení stanovených. ÚCL povolení vydá, nebudou-li ohroženy bezpečnost létání ve vzdušném prostoru, stavby a osoby na zemi a životní prostředí. Konkretizace podmínek, za kterých jsou bezpilotní systémy legislativně definovány a regulovány uvádí obsah leteckého předpisu L 2, plynoucí z ustanovení § 102 odst. 2 leteckého zákona a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů, jakož i dalších skutečností, majících vliv na bezpečnost leteckého provozu. Konkrétně hovoříme o Doplnku X leteckého předpisu L 2 (dále jen „Doplněk“), který, ačkoliv ukotven v předpisu L 2, spadá pouze pod českou právní úpravu a není zahrnut v žádné podobné formě, ani v ICAO Annex 2. (3) Na vytvoření tohoto Doplnku pracoval především ÚCL, který na základě narůstající problematiky spojené s provozem bezpilotních strojů ve společném civilním vzdušném prostoru vymezil v organizační struktuře kapacity pro vytvoření oddělení bezpilotních systémů, vyčleňujícího se z oddělení leteckých předpisů. Tomuto kroku předcházelo několik procesních úkonů, jako vytvoření podrobného regulačního rámce. Rámec, vytvořený na přelomu roku 2007, kromě identifikace rizik, definoval aplikovatelné postupy pro bezpečný provoz v oblastech ochranných perimetrů letišť. V tomto roce bylo rovněž rozhodnuto v ustanovení meziresortní komise, ve které se zástupci ÚCL, MD (Ministerstvo dopravy) a ŘLP (Řízení letového provozu), za rozhodnutí příslušných úřadů, dohodli na vzniku právě oddělení bezpilotních systémů. Tento regulační rámec spadá pod účinnost ÚCL. Úřad pro civilní letectví byl zřízen dne 1.4.1997 leteckým zákonem a je přímo podřízen Ministerstvu dopravy. Úředníci provádí státní dozor v rámci ustanovení § 90 leteckého zákona a dalších činností, plynoucích z § 3 a § 89 téhož zákona. (4)

2.1 Terminologie

Bezpilotní létání je v rámci letectví dynamicky se rozvíjející obor. Vzhledem v široké škále označení a klasifikace prostředků je důležité dodržovat názvosloví a rozlišovat pojmy, které jsou, především širokou veřejností, často zaměňovány. Pojmy a zkratky, které budou definovány v této části, budou používány v rámci celé této práce. Základní definice jednotlivých prostředků užívaných v rámci bezpilotního letectví jsou zakotveny v české legislativě, jedná se zejména o:

Bezpilotní systém (UAS) – „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. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více.“ (5)

Bezpilotní letadlo (UA) – „letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. V mezinárodním kontextu nadřazená kategorie dálkově řízených letadel, autonomních letadel i modelů letadel. Doplněk s pojmem pracuje pro všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s MTOM nepřesahující 25 kg.“ (5)

Autonomní letadlo – „bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.“ (5)

Model letadla – „letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používané pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuální dohledu.“ (5)

V literatuře se lze setkat také s pojmy dálkově řízené letadlo (RPA), dálkově řízený letadlový systém (RPAS) nebo bezpilotní prostředek (UAV), který však ICAO označuje za zastaralý. (6) Pro popis letadla bez pilota na palubě, v kontextu především armádních prostředků, uvádí zahraniční literatura pojem dron z anglického „drone“, pocházejícího z anglosaské terminologie blanokřídlých (7), který se donedávna nepovažoval za termín odborný (svou významovostí v anglickém jazyce neřadí pouze pod označení v rámci oboru letecké dopravy). ICAO v rámci své působnosti rovněž tento pojem donedávna jako značení neužívala. V oběžníku číslo 328 z roku 2011, stejně tak, jako v dokumentu 10019 – Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), vydaného v roce 2015, ani v jednom z ustanovení toto označení neužívá. (8) (9) Ke změně došlo v roce 2018, kdy se na sympoziu ICAO v Chengdu užíval pojem „drone“ již jako oficiální pojmenování bezpilotního letadla. (10)

2.2 Doplněk X

Doplněk X tvoří od 1. března 2012 součást předpisu Ministerstva dopravy č. L 2, pravidla létání a nabytím dne právní vymahatelnosti jeho platnosti byl legislativně ukotven pojem bezpilotní letadlo. V souvislosti s touto problematikou bylo potřeba vyřešit dosavadní stav civilního letectví, vycházející především z leteckého zákona, kdy byla většina dálkově řízených letadel, resp. modelů letadel, v civilním vzdušném prostoru ČR provozována modeláři, za účelem sportovním či rekreačním. V kontextu modelářského létání definoval odpovědnost pilotů modelů letadel z velké části občanský zákoník. S nástupem předních technologických vývojářů bezpilotních letadel, a především jejich masivnímu marketingovému rozšíření, bylo novým cílem vytvořit ucelenou legislativní úpravu vymezující pravidla pro jejich pohyb ve společném vzdušném prostoru. Nezbytnost této úpravy nespočívala pouze v definici pravidel

provádění samotných letů, ale také oddělení komerčních aktivit provozovaných těmito prostředky od aktivit modelářských, pro letadla s MTOW do 25 kg.

Bezpilotní letadla je ve většině případech možné provozovat pouze s povolením ÚCL. Jedná se zejména o povolení k létání a dále o povolení k provozování leteckých prací, leteckých činností pro vlastní potřebu nebo k provozování obchodní letecké dopravy. Během provozu ve vzduchu musí pilot, nebo kromě něho i poučená osoba, udržovat přímý vizuální kontakt s letadlem. Vizuální kontakt nesmí být zprostředkován technickým rozhraním, jako například brýlemi pro virtuální realitu – FPV (First Person View). FPV je druh provozu, při kterém pilot nemá letadlo v přímém vizuálním kontaktu, tedy BVLOS (Behing Visual Line of Sight). Jedná se o letový mód, který pilotovi umožňuje pilotovat letadlo ze země a užívat přitom obraz z kamery letadla, který je přenášen v reálném čase do zvoleného rozhraní (monitor, brýle).

(11) Při provádění letové činnosti je za provedení letu, včetně předletové přípravy a také kontroly odpovědní osoba, kterou je dálkově ovládaný systém řízen. S tím je také spojená další zodpovědnost, kterou Doplněk definuje. Obecně lze konstatovat, že za veškeré letové úkony odpovídá pilot. V případech, ve kterých je pilotem osoba jiná než osoba vlastníka a provozovatele, je přenesena dodatečná zodpovědnost na tyto dva subjekty, především v oblasti zachování a umožnění kontroly zachování letové způsobilosti. Dále musí být veden deník letadla, do něhož pilot zaznamenává informace o letu, tedy: jméno pilota, označení letadla, místo vzletu a přistání, druh letové činnosti a potenciální události související s bezpečností letu (povinnost hlásit události spojené s bezpilotním letadlem se vztahuje na všechna bezpilotní letadla se schválenou konstrukcí a/nebo letadla s provozním povolením, přičemž působ hlášení událostí je stanoven v ustanovení 4.12 předpisu L 13).

Jednou z nejdůležitějších částí Doplnku je definice podmínek letů v rámci jednotlivých částí vzdušného prostoru a dalších podmínek pro provoz UAS. Struktura vzdušného prostoru je mezinárodní, překračuje hranice a umožňuje dlouhé lety v chráněném prostoru. Organizační uspořádání se postupně sjednotilo, došlo k uspořádání a členění vzdušného prostoru na letové oblasti, koncové řízené oblasti a okrsky letišť. Vzdušné prostory letových provozních služeb jsou klasifikovány a označovány pomocí tříd A až G. V České republice jsou stanoveny čtyři třídy vzdušného prostoru – C, D, E, G. V rámci uspořádání vzdušného prostoru existuje pravidlo tam, kde spolu vertikálně sousedí, tj. jsou jeden nad druhým. V takovém případě platí, že lety ve společné lety těchto prostorů musí vyhovovat požadavkům méně omezující třídy vzdušného prostoru, přičemž se těmito letům poskytují služby stanovené pro méně omezující třídu. (12) Pouze ve zcela výjimečných případech, a to za povolení ÚCL, je provoz UAS realizován mimo prostor třídy G. Tato logická podmínka vychází z dalších ustanovení Doplnku, a omezení v povolení ÚCL, jako například provoz letadla při přímém vizuálním kontaktu pilota

– VLOS (Visual Line of Sight). Problematika provozu UAS mimo povolenou třídu vzdušného prostoru je velice problematická. Důvody těchto omezení plynou především z hustoty letového provozu, přístupnosti těchto technologií a v současné době technickému vybavení většiny UAS, která ve svých palubních a pozemních segmentech nedisponují dostatečnou mírou kvality a redundance technického zabezpečení v prostorech s okolním provozem pilotovaných strojů. V rámci provozních omezení je soustředěn důraz na provoz v okolí letišť. Při letech v Letištních provozních zónách – ATZ (Aerodrome Traffic Zone) či Oblastech s povinným radiovým spojením – RMZ (Radio Mandatory Zone) neřízeného letiště musí pilot splnit podmínky definované doplňkem. Jedná se především o podmínky provozovatele daného letiště, koordinace s AFIS (Aerodrome Flight Information Service), tedy Letištní a letovou informační službou, se stanovištěm poskytování informací známému provozu nebo s provozovatelem letiště, není-li AFIS nebo poskytování informací známému provozu zajištěno. Nad vzdušným prostorem třídy G v ATZ lze lety provádět, jen pokud se poskytuje AFIS nebo je zajištěno poskytování informací známému provozu. Pokud je provoz realizován letadlem anebo modelem letadla nepřesahujícím maximální vzletovou hmotnost MTOW (Maximum Takeoff Weight) 0,91 kg, nemusí být prováděn za koordinace, avšak výška letu nesmí v žádném okamžiku přesáhnout 100 m. Za předpokladu provozu v řízeném okrsku CTR (Control Zone) či vojenském řízeném okrsku MCTR (Military Control Zone), pokud není vydáno povolení příslušného stanoviště pro let nad rámec těchto podmínek¹, nesmí letadlo v žádné fázi letu překročit hranici 5 500 m horizontální vzdálenosti od vztažného bodu letiště ARP (Airport reference point) a zároveň úrovně 100 m nad zemí. Při provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla v CTR a MCTR ve vzdálenosti menší než 5 500 m od ARP, kromě provozu bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla s MTOW do 0,91 kg mimo ochranná pásma letiště, nebo ve výšce vyšší než 100 m nad zemí, je rozhodnutí o použitelnosti uvedených požadavků ponecháno na uvážení příslušného stanoviště řízení letového provozu. Obecně o provozu platí, že není uplatňováno výškové omezení ve smyslu minimální výšky a rovněž není povolen (pokud ÚCL nepovolí jinak) provoz v zakázaných prostorech (LKP), nebezpečných prostorech (LKD), omezených prostorech (LKR), dočasně vymezených (rezervovaných) prostorech (TRA) a prostorech dočasně vyhrazených (TSA). (5)

V oblasti státní regulace je však potřeba definovat provoz i v dalších specifických prostorech, které nejsou omezovány jen z hlediska pravidel uspořádání vzdušného prostoru, ale také z hlediska jiných právních úprav. Typicky se jedná o prostory, které standardně udělená provozní povolení neobsahují a je v současné době potřeba podat speciální žádost pro provoz v těchto prostorech. Jedná se zejména o využití možnosti dané ustanovením 16 g) Doplňku,

¹ Stanoviště může vydat povolení obsahující požadavek na oboustranné radiové spojení a vybavení odpovídačem sekundárního radaru, plynoucí z předpisu L 11.

provozu ve vzdálenosti menší než 150 m od hustě osídleného prostoru, resp. provozu v tomto prostoru. Každá žádost o takový provoz je individuálně vyhodnocována. Kromě analýzy dopadových zón definovaných provozovatelem dochází rovněž ke kontrole záměru dodržování bezpečné vzdálenosti od ochranných pásem, především definovaných v zákonech: 254/2001 Sb., 13/1997 Sb., 458/2000 Sb., 458/2000 Sb., 114/1992 Sb., 266/1994 Sb., 127/2005 Sb., 127/2005 Sb., 458/2000 Sb. a také v českých technických normách ČSN 73 6006 a 73 6007.

Tabulka 1 – definice vybraných vzdušných prostorů (12)

Třída vzdušného prostoru	B	C, D, E	F, G	
			Nad 900 m (3000 ft) AMSL nebo 300 m (1000 ft) nad terénem podle toho, co je vyšší	V a pod 900 m (3000 ft) AMSL nebo 300 m (1000 ft) nad terénem podle toho, co je vyšší
Vzdálenost od oblaků	Vně oblaků	1500 m horizontálně, 300 m vertikálně	Vně oblaků a za viditelnosti země	
Letová dohlednost	8 km v/a nad 3050 m (10000 ft) AMSL 5 km pod 3050 m (10000 ft) AMSL		5 km	

2.3 Řízení bezpečnosti a spolehlivost

ICAO, specializovaná organizace Spojených národů kodifikuje principy a techniky pro rozvoj letecké dopravy. Tato organizace rovněž doporučila členským státům, aby společně vyvinuly a zavedly programy SMS (Safety Management System) a dosáhly tak přijatelné úrovně bezpečnosti v letectví. V současnosti jsou tyto požadavky vztaženy na Annex 6 – Provoz letadel, Annex 11 – Letové navigační služby a Annex 14 – Letiště. V roce 2010 bylo rovněž rozhodnuto o implementaci již vytvořených i nově vzniklých požadavků SMS do jednotného rámce v podobě současného Annexu 19 – Řízení bezpečnosti. Hlavním cílem programů SMS je zvýšení bezpečnosti, který je pomocí SMS dosažitelný. (13)

Dle ICAO je SMS systematickým přístupem pro řízení bezpečnosti, jež zahrnuje nezbytné organizační struktury, odpovědnosti, politiky a postupy. (14) Ministerstvo obrany USA v definici z roku 1966 uvádí systémovou bezpečnost jako osvobození od všech podmínek způsobujících zranění či smrt osoby, nebo poškození a ztrátu majetku nebo vybavení. (15) Z české právní úpravy vyplývá definice bezpečnosti (safety) jako „stav, při kterém jsou rizika spojená

s leteckými činnostmi souvisejícími s provozem letadel nebo jej přímo podporujícími snížena a řízena na přijatelné úrovni.“ Zároveň dochází k definici pojmů jako bezpečnostní riziko, tedy předpokládaná pravděpodobnost a závažnost následků nebo výsledků nebezpečí. Za incident je označována událost jiná než letecká nehoda, spojená s provozem letadla, která ovlivňuje nebo by mohla ovlivnit bezpečnost provozu. Letecká nehoda je oproti tomu „událost spojená s provozem letadla, která se, v případě pilotovaného letadla, stala mezi dobou, kdy jakákoliv osoba nastoupila do letadla s úmyslem vykonat let a dobou, kdy všechny takové osoby letadlo opustily, nebo která se, v případě bezpilotního letadla, stala mezi dobou, kdy letadlo je připraveno k pohybu pro účely letu a dobou, kdy zastaví na konci tohoto letu a hlavní pohonná soustava je vypnuta.“ (16)

V SMS systémech je velice důležitý pojem bezpečnostního rizika. Riziko lze definovat jako potenciální realizaci nežádoucích až nepříznivých důsledků pro člověka, především ve smyslu ohrožení na zdraví, majetku či životního prostředí. Odhad rizika je založen na očekávané hodnotě podmíněné pravděpodobnosti a očekávaném důsledku případné události. (17) Pravděpodobností výskytu tohoto rizika rozumíme četnost výskytu následků nebezpečí.

Tabulka 2 – pravděpodobnost bezpečnostních rizik (14)

Pravděpodobnost	Význam	Hodnota
Časté	Pravděpodobnost výskytu: mnohonásobná. Vyskytuje se téměř pokaždé.	5
Občasné	Pravděpodobnost výskytu: časté. Vyskytuje se často.	4
Vzdálené	Pravděpodobnost výskytu: minimální. Téměř se nevyskytuje.	3
Neppravděpodobné	Pravděpodobnost výskytu: téměř žádná. Není znám její výskyt.	2
Extrémně neppravděpodobné	Pravděpodobnost výskytu: nulová. Téměř jednoznačně k události nedojde.	1

Poté co dojde k posouzení pravděpodobnosti výskytu, musí být stanovena míra závažnosti identifikovaných rizik, resp. jejich dopadů. Posuzování závažnosti závisí především na případných důsledcích, které s nebezpečím souvisejí. Závažnost bezpečnostního rizika je definována jako „rozsah škod, které by se mohly vyskytnout jako důsledek nebo výsledek zjištěného nebezpečí.“ Mezi hlavní kritéria při posuzování závažnosti patří:

- a) úmrtí nebo úraz – kolik životů může být ztraceno (osoby zainteresované i nezainteresované do provozu),

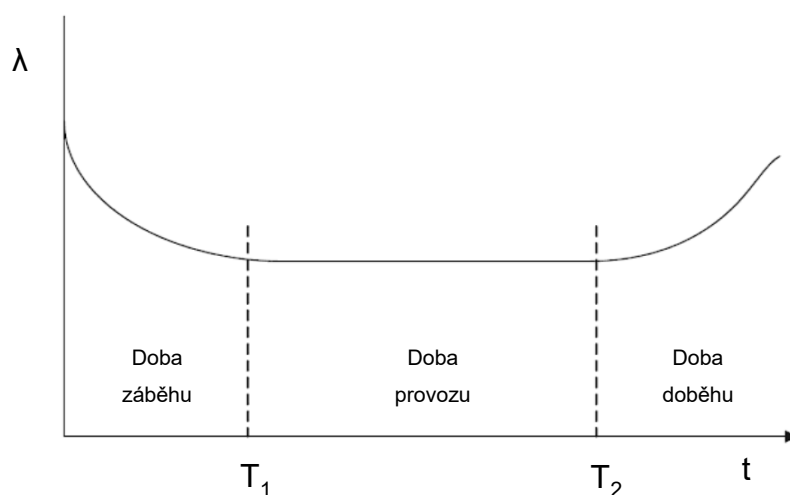
b) poškození – pravděpodobný rozsah poškození letadla, majetku nebo vybavení. (14)

Do celkové kalkulace kvantifikace rizik pak můžeme zahrnout také dobu trvání rizika či frekvenci, s jakou se dané riziko opakuje. (18)

Tabulka 3 – dopady bezpečnostních rizik (14)

Dopad	Význam	Hodnota
Katastrofální	Zařízení zničeno, úmrtí.	A
Nebezpečný	Rozsáhlá poškození zařízení, těžká zranění.	B
Vážný	Poškození zařízení, zranění.	C
Malý	Aplikace nouzových postupů, provozní omezení, menší incident.	D
Zanedbatelný	Zanedbatelné následky.	E

Z pohledu bezpečnosti musíme sledovat stavy objektu (entity), ve kterých se během provozu nachází. Z tohoto hlediska v bezpečnostním inženýrství pracujeme s pojmem spolehlivost. Tato oblast lidského zkoumání nedisponuje jednou flagrantní teorií, nýbrž je nutno čerpat z více zdrojů pro získání uceleného pohledu na její problematiku. Můžeme ji tedy sledovat jako schopnost objektu plnit požadovanou funkci za určitý čas a podmínky, pro které byl navržen. (19) Průběh intenzity poruch, které vznikají ať už z podmínek pro systém přirozený či nikoliv, můžeme graficky definovat takto:



Obrázek 1 – charakteristický průběh intenzity poruch (45)

kde je λ – intenzita poruch, t – čas a T – ohraničení dob. Je to tedy pravděpodobnost, se kterou bude plnit funkce tak jak má, po předem definovaný čas. Vzhledem k tomu, že ji můžeme

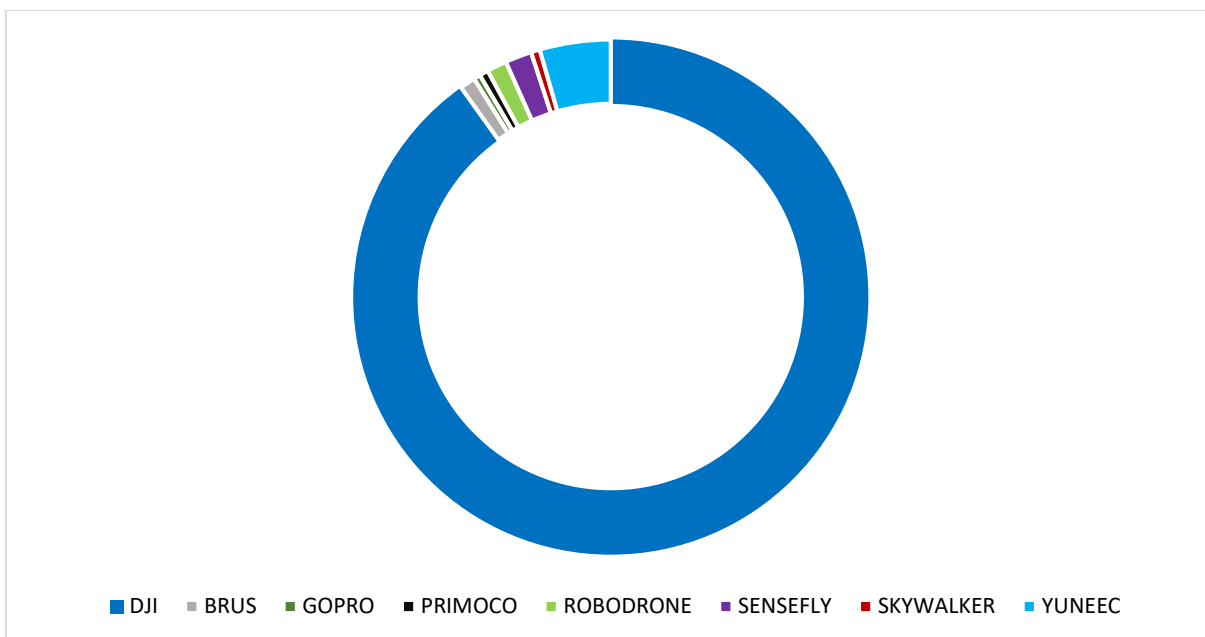
vyjadřovat jako formu pravděpodobnosti, její hodnota se bude pohybovat v intervalu od nuly do jedné, čímž získáváme kvantifikované vyjádření spolehlivosti. (20)

Technické normy řízení jakosti pohlíží na spolehlivost jako na souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují. Patří mezi ně: bezporuchovost (schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek), udržitelnost (schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci tehdy, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy i prostředky) a zajištěnost údržby (schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat dle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu v souladu s koncepcí údržby). (21)

Pro účely praktického experimentu nebude zkoumána teorie spolehlivosti ryze vycházející z technických norem. Vzhledem k povaze této práce, měření, dostupných nástrojů a systému, který je předmětem pozorování, bude analýza spolehlivosti spočívat ve sledování jednotlivých prvků, které se na případném selhání systému podílí, jejich vzájemné interakce, závislosti a stanovení výsledné procentuální míry, po kterou sledovaný systém plnil požadovanou funkci při zachování stanovených provozních ukazatelů v daných mezích, poukazující na míru správné funkčnosti systému, která byla v rámci experimentální realizace naměřena.

2.4 Současný stav provozu

Současný stav registrovaného provozu UAS disponuje v rámci dopravního sektoru jedním zásadním specifickým, jež spočívá v počtu strojů jednoho výrobce provozovaných v rámci společného vzdušného prostoru. Rozšíření bezpilotních letadel firmy DJI není záležitostí pouze v rámci území České republiky nebo Evropské unie, nýbrž celého světa. Mezi faktory, které za masivním rozšířením pouze jednoho výrobce stojí, řadíme především náskok v technickém vývoji, produktovým portfoliem, vysokou mírou kapitálu a s tím spojené možnosti aplikace celosvětové marketingové kampaně. Komerční bezpilotní letadla zatím nemají dlouhou provozní historii, a i proto se neustále vyvíjejí. Výhody použití těchto prostředků je jednoduchý provoz a ovládání. (22) V souvislosti s tím je z hlediska užití, konstrukce či principu, pomocí kterého vyvozují vztlak, můžeme dělit na několik typů. Produktové portfolio firmy DJI sice v současné době zahrnuje pouze koptéry, nikoliv letouny, kluzáky či balón, ale i přes to lze v budoucnu předpokládat rozmanitost bezpilotních prostředků ve vzdušném prostoru. Zároveň se jedná o stav, který lze sledovat takřka od počátku agendy bezpilotních systémů v České republice. Koptéra je díky své konstrukci značně stabilní a schopna visu. Tyto dva základní parametry vytváří značný potenciál v užití pro letecké práce, případně letecké činnosti pro vlastní potřebu.

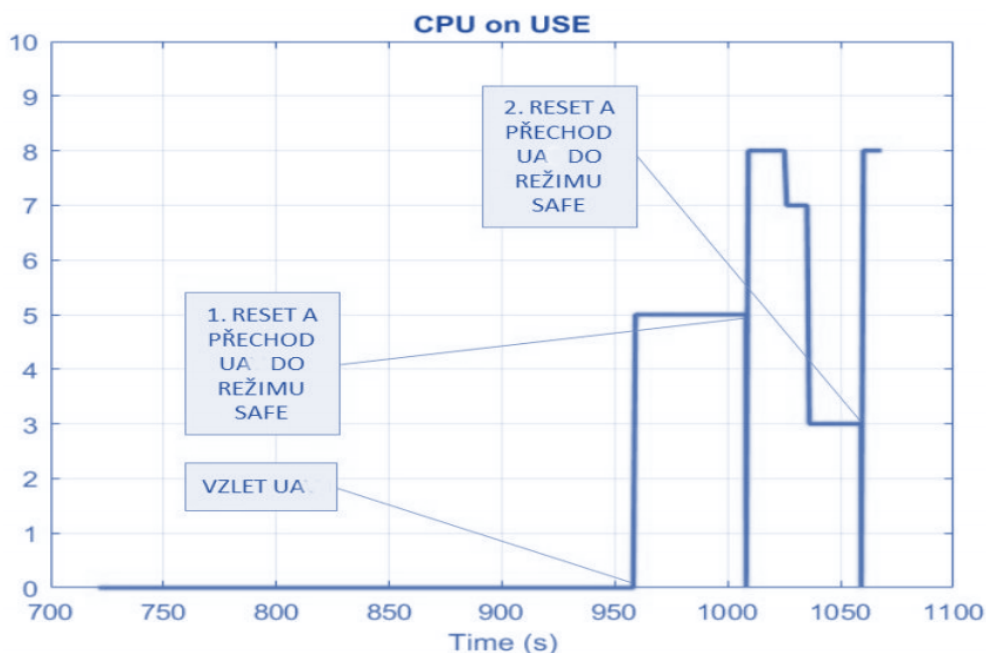


Graf 1 – zastoupení výrobců UAS evidovaných ÚCL k 1. 3. 2019 (23)

V poměru celkového počtu registrovaných letadel je jasné, že pro celkovou bezpečnost civilního letectví v oblasti UAS je nutné dostatečně zabezpečit vysokou míru spolehlivosti kritického systému, jež je instalován právě do nejzastoupenější skupiny koptér. Nejsou to však pouze letadla DJI, která jsou osazena systémy failsafe. ÚCL ve své agendě registruje rovněž nezanedbatelné množství letadel dalších konstrukcí. Hovoříme především o vrtulnicích, kluzácích, samokřídlech či letounech. Pro většinu zmíněných prostředků platí pravidla Doplnku, a tedy s tím související systémy pro bezpečné ukončení letu, také. Problémem části z těchto prostředků v úseku civilního letectví je občasná výrobní nedokonalost a také nedostatečná redundance systémů, způsobená výrobou, která je realizována v podmínkách provozovatelů na amatérské bázi. V opačném spektru těchto zařízení můžeme nalézt sofistikované letouny s výrobním a materiálním zázemím, technickou a personální podporou, disponující softwarem vlastního vývoje. Kupříkladu „dne 15. února 2017 ÚZPLN obdržel oznámení o letecké nehodě bezpilotního letadla². Letoun odstartoval na autopilota z letiště Příbram. Ve vzdálenosti cca 800 m od místa vzletu, ve výšce 80–100 m AGL došlo k vysazení motoru. Pilotovi se nepodařilo po opakovaném resetu řídicí jednotky autopilota obnovit režim letu a letoun v 16:39 z výšky 50 m AGL neřízeně narazil do lesního porostu v blízkosti letiště. Příčinou letecké nehody byla ztráta funkčnosti automatického systému řízení spojená s vysazením motoru v průběhu stoupání do plánované výšky letu. Příčinu resetu řídicí jednotky se v průběhu vyšetřování nepodařilo odhalit.“ (24) Z této zprávy jasně vyplývá, že ačkoliv je bezpilotní letoun osazen sofistikovanou řídicí jednotkou a zároveň failsafe systémem, může

² PRIMOCO UAV MODEL ONE-100.

jejich špatná kooperace a vzájemná kompatibilita nedostatečně chránit celkovou bezpečnostní architekturu letadla. Směrodatným hlediskem pro posuzování bezpečnosti stroje tedy nemůže být pouze činnost jednoho systému, nýbrž celé spektrum systémů, jako spolupracujících prvků nutných pro provoz.



Obrázek 2 – grafický průběh činnosti CPU a failsafe (24)

Grafické znázornění na obrázku 2 – grafický průběh činnosti CPU a failsafe totiž ukazuje činnost centrální procesorové jednotky (CPU – Central Processing Unit), která je centrálním systémem pro řízení letadla. Před vzletem se autopilot nacházel v manuálním režimu a příkazem operátora přešel do režimu plně automatického vzletu. Necelou minutu po vzletu náhle došlo k resetu CPU, po kterém letadlo automaticky přešlo do režimu „safe“. „Tento režim se aktivuje automaticky a uvede UA do předem nastavené bezpečnostní výšky, následně přepne do módu „land“ a k realizaci naprogramovaného přistávacího plánu. Po dalších 50 s došlo k opětovnému resetu řídicí jednotky a uvedením systému opět do módu „safe“. Systém letadla byl nastaven tak, že v případě resetu řídicí jednotky, která je součástí AP (autopilota), dojde současně k vypnutí motorové jednotky. Vzhledem k tomu, že v průběhu dvou výpadků činnosti řídicí jednotky AP a tím i vypnutí motoru UA došlo k významné ztrátě výšky, nepodařilo se po druhém spuštění motoru obnovit režim letu.“ (24) Letadlo tedy nebylo schopno automaticky obnovit chod motorové jednotky paralelně s obnovením činnosti řídicí jednotky a následný manuální zásah pilota nebyl vzhledem k velké ztrátě letové výšky dostatečným východiskem.

3 Harmonizovaná legislativa UAS

Stále se zrychlující vývoj bezpilotních letadel byl v ČR již od r. 2012 jako v jedné z prvních zemí EU vymezen provozními pravidly (tzv. Doplněk X), zajišťujícími postupné začleňování rozvíjejícího se bezpilotního provozu do společného vzdušného prostoru a zároveň zaručujícími bezpečnost nezúčastněných osob na zemi i ve vzduchu. Mezinárodní spolupráce mezi úřady přinesla alespoň podobnost ve struktuře této oblasti legislativy, sjednocení požadavků a pravidel však v jednotlivých státech nebylo ani v dalších letech dosaženo. Tato fragmentace brzdí mezinárodní rozvoj služeb poskytovaných provozovateli bezpilotních letadel a není výhodná ani ze strany výrobců, tak ani ze strany veřejnosti.

Pro zajištění rovných podmínek provozu bezpilotních letadel v rámci Evropské unie byla vypracována společná evropská pravidla. Tato pravidla mají přispět k rozvoji společného evropského trhu a zároveň zajistit bezpečný provoz a respektování soukromí a bezpečnosti občanů EU.

Unijní legislativa by měla přinést zejména:

- jednotná pravidla provozu UAS v celé EU,
- rozdělení provozu UAS do nových kategorií,
- zvýšení bezpečnosti a povědomí při samotné koupi UAS v EU,
- povinnou registraci všech uživatelů UAS nad 250 g nebo 80 J dopadové kinetické energie,
- rozvoj trhu, vytvoření správy provozu UAS (Unmanned Aircraft Traffic Management System, dále jen „UTM“), e-identifikaci a klasifikované scénáře pro využití UAS a další.

3.1 Aktuální stav regulačního rámce

Dne 11. září 2018 nabylo účinnosti nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví. Jedná se o tzv. základní nařízení, ustavující jednak vznik a fungování EASA, ale předně také jednotným způsobem upravující letový provoz v mnoha jeho oblastech, nově také v oblasti létání letadel bez pilota na palubě. (25)

Dne 28. února 2019 Výbor EASA hlasoval pro schválení návrhu prováděcího aktu Evropské komise upravujícího provoz bezpilotních systémů v Evropě a registraci bezpilotních letadel a jejich provozovatelů. Prováděcí akt je doplněn aktem v přenesené pravomoci, který stanovuje technické požadavky na bezpilotní systémy. Prováděcí akt byl přijat Evropskou

komisí dne 12. března 2019 a zaslán Evropskému parlamentu a Radě EU na povinné dvouměsíční přezkumné období. Pokud nebudou vneseny žádné námitky, budou oba akty zveřejněny do léta 2019 a nařízení bude postupně uplatňováno do jednoho roku od zveřejnění. Po skončení přechodného období bude nařízení plně použitelné od roku 2022. (26)

3.2 Budoucí kategorizace provozu UAS

Návrh Evropské Komise deklaruje nové kategorie provozu UAS na provoz v otevřené kategorii (open), specifické kategorii (specific) a certifikované kategorii (certified). Každá skupina představuje určitou míru rizika, kterou je nutné vhodným přístupem posoudit a mírnit.

3.2.1 Otevřená kategorie (Open)

Provoz v otevřené kategorii představuje nízkou míru rizika a není nutné do registrace zapojovat národní úřady. Bezpečnost je zajištěna dodržováním provozních omezení, hmotnostních omezení, případně omezení pomocí kinetické energie. Jsou stanoveny požadavky na bezpečnost výrobků a stanovením provozních pravidel. Otevřená kategorie má stanovenou maximální vzletovou hmotnost (MTOM) do 25 kg a maximální letovou výšku 120 m. Lety v této kategorii jsou prováděny pouze za trvalého vizuálního dohledu pilota (VLOS). V této kategorii není možné létat v blízkosti letišť. Provoz v této kategorii podrobněji popisuje tabulka 4 – pravidla pro open kategorii.

U otevřené kategorie je vyžadováno označení letadel značkou CE, které udává splnění požadavků kladených na umístění výrobků na trh Evropského hospodářského prostoru a splňuje legislativní požadavky EU. (27) Nejedná se tedy o certifikaci letadel jako takovou. Online výcvik a absolvování on-line testu je povinné pro letadla těžší 250 g. Přesná forma výcviku není doposud známá.

Otevřená kategorie se dále dělí na tři podkategorie.

V kategorii A1 je umožněno přelétávat nad lidmi (ale ne nad shromážděním lidí, které je definováno jako 12 osob). Tato kategorie je primárně určena pro hobby uživatele s letadly do MTOM 900 g (nebo kinetickou energií do 80 J).

Kategorie A2 je určena pro lety v bezpečné vzdálenosti od osob a umožňuje lety těžším letadlům. Pro třídu C2 je nutné absolvovat teoretické zkoušky.

Kategorie A3 je přístupná pro lety mimo osoby a je určena zejména pro modelářské kluby. V této kategorii dále dělíme letadla na kategorii C3 a C4.

Tabulka 4 – pravidla pro open kategorii (28)

Provoz		Požadavky na pilota	UAS				Registrace provozovatele
Kategorie	Oblast provozu (mimo letiště, $h_{max}=120$ m)		Třída	MTOM/ Joule [J]	Technické požadavky	Geo-fencing/ E-ID	
A1 Let nad lidmi	Nad nezúčastněnými osobami	Seznámit se s manuálem letadla	Vlastní výroba	<250 g	Ne	Ne	Ne
			C0		Dokumentace výrobce, $v < 19$ m/s, bez ostrých hran, volitelný výškový limit		
A2 Let v blízkosti osob	V bezpečné vzdálenosti od nezúčastněných osob	Seznámit se s manuálem letadla Online výcvik Online test Test na ÚCL	C2	<4 kg	Dokumentace výrobce, $v < 19$ m/s, kinetická energie, bez ostrých hran, failsafe, volitelný výškový limit, mód letu v nízkých rychlostech	Ano + sériové číslo	Ano
A3 Let mimo osoby	V oblast bez předpokládaného výskytu nezúčastněných osob Udržování bezpečné vzdálenosti od hustě osídlených oblastí	Seznámit se s manuálem letadla Online výcvik Online test	C3	<25 kg	Dokumentace výrobce, failsafe, volitelný výškový limit	Ano + sériové číslo	Ano
			C4		Dokumentace výrobce, zákaz automatického letu		
			Vlastní výroba		Ne		

Pokud požadavky na zamýšlený provoz vybočují z uvedených kategorií, spadá do specifické kategorie.

3.2.2 Specifická kategorie (Specific)

Tato kategorie se týká především provozovatelů komerčních služeb s UAS, které se nevejdou do otevřené kategorie. Provoz v této kategorii představuje zvýšené riziko, kdy musí dojít ke schválení provozovatele ze strany Úřadu pro civilní letectví. Úřad sleduje provozní příručku, letovou způsobilost letadla a odbornou způsobilost posádek. Specifická kategorie vyžaduje také analýzu rizik ze strany provozovatele, které by mělo být provedeno v souladu s metodikou zpracovanou mezinárodní organizací JARUS, Specifické provozní posouzení rizik (SORA).

K dispozici této kategorii budou i tzv. standardní scénáře, které budou v nejbližší době publikovány EASA. Standardní scénáře budou zahrnovat různé typy provozu a pro každý typ provozu budou stanovovat podmínky, za kterých může být let uskutečněn. Pokud bude zamýšlený provoz odpovídat nějakému publikovanému standardnímu scénáři, provozovatel Úřadu pro civilní letectví deklaruje provoz za uvedených podmínek. Provozovatel si tak může zvolit, zdali bude létat podle standardních scénářů nebo zažádá Úřad pro civilní letectví o provoz nad rámec těchto podmínek. (29)

Pro provoz v této kategorii bude klíčovým úkolem zajištění tzv. e-identifikace, kdy letadlo bude schopné vysílat svou polohu a výšku v reálném čase pomocí přiděleného identifikátoru. Přesná podoba identifikátoru je současně předmětem jednání na mezinárodní úrovni.

Dalším významným prvkem umožňující provoz ve specifické kategorii je zpřístupnění správcovského systému pro provoz UAS a vytvoření podmínek pro rozvoj UTM. Takový systém umožní nové možnosti létání UAS se souhlasem autorit v reálném čase, a dokonce umožní provoz mimo vizuální dohled pilota (BVLOS).

3.2.3 Certifikovaná kategorie (Certified)

Tato nejvyšší kategorie UAS je v současné době nejméně specifikovaná. Vzhledem k tomu, že do této kategorie budou převážně spadat vojenská letadla a letadla určená pro přepravu osob, požadavky na tuto kategorii jsou srovnatelné s požadavky pro běžnou leteckou dopravou s posádkou na palubě. Tato kategorie představuje vysokou míru rizika provozu a je tedy nezbytné certifikovat jak letadlovou techniku, tak i posádky.

Velmi zajímavou část evropské legislativy tvoří rámec věnující se UTM (U-Space v Evropském pojetí). UTM je systém, který znamená soubor nových služeb a specifických postupů vedoucích k bezpečnému a efektivnímu přístupu do vzdušného prostoru pro UAS. Smyslem zavedení UTM systému je plně integrovat bezpilotní systémy do vzdušného prostoru. Takovýto systém požaduje vysokou míru automatizace a digitalizace. (30)

3.3 Další legislativní kroky

Agentura EASA po zveřejnění nařízení EU doplní prováděcí pravidla o poradenský výkladový materiál (GM) a popis přijatelných způsobů vedoucích ke splnění požadavků nařízení (AMC), se zřejmě nejpodstatnější částí popisující, jak správně posoudit rizika pramenící ze zamýšleného provozu letadel specifické kategorie. Tento materiál se očekává v průběhu 2. čtvrtletí 2019.

Agentura EASA zároveň pracuje na dalších krocích vedoucích k umožnění bezpečného provozu bezpilotních systémů a integraci těchto nových uživatelů do evropského vzdušného prostoru. Ve 4. čtvrtletí 2019 očekáváme stanovisko EASA ke standardním scénářům pro provoz ve „specifické“ kategorii a dále stanovisko EASA k U-Space včetně základního regulačního rámce. EASA, spolupracující dlouhodobě v ICAO RPASP na tvorbě pravidel pro mezinárodní bezpilotní provoz IFR, bude také pracovat na oznámení o navrhované změně (NPA) pro bezpilotní systémy v „certifikované“ kategorii, které bude zahrnovat komplexní balíček pro všechny oblasti letectví (osvědčení letové způsobilosti, zachování letové způsobilosti, způsobilost dálkově řídicích pilotů, provoz letadel, ATM/ANS a letiště). NPA se očekává ve 4. čtvrtletí 2019 nebo 1. čtvrtletí 2020. EASA se rovněž ve spolupráci s JARUS angažuje ve tvorbě standardů pro letadla kategorie open a specific a ve tvorbě osvětového materiálu určeného pro širokou veřejnost. (26)

4 Failsafe systém

System failsafe je jedním z prvků, jehož implementace zaručuje zvýšení bezpečnosti napříč různými odvětvími, tedy i leteckého, ale také jiných, vyznačujících se vysokými nároky na bezpečnost. V případě letectví lze v širším slova smyslu bezpečnost definovat jako minimalizaci pravděpodobnosti srážky nebo incidentů ve vzduchu nebo na zemi na co nejmenší praktickou hodnotu. Dále znamená ochranu vůči fyzickým nebo elektronickým narušením, ohrožující celkovou bezpečnost, stejně tak, jako poskytuje adekvátní formu zálohování vytvářením systémů bezpečných při poruše. Bezpečnost v letecké dopravě bude i nadále nabývat proto stále většího významu pro životaschopnost letectví jako systému. (12) Systémy failsafe jsou používány v soustavách, které jsou konstrukčně složité, či systémech s vysokou mírou požadavků na spolehlivost a funkčnost i v případě poruchy. Z toho vyplývá jejich uplatnění v širokém spektru oborů lidské činnosti, kupříkladu drážní dopravy (signalizační soupravy, tlaková (brzdící) potrubí), jaderné energetiky (reaktory) nebo informatiky (mikroprocesory).

Pojem failsafe vznikl z anglického „fail“, tedy porucha a „safe“ – bezpečnost. (31) Pojem není definicí konkrétní konstrukce nebo zařízení, ale jako vlastnost systému, která svou povahou zvyšuje jeho spolehlivost a snižuje rozsah negativních dopadů v případě incidentu.

FAA definuje návrh systému failsafe struktury jako ten, který v případě poruchy nebo selhání částečně uchová funkčnost hlavního konstrukčního prvku. Tento systém se tedy často skládá z hlavních konstrukčních prvků a redundantní struktury systému zálohy v případě poruchy. Při posuzování bezpečnosti struktury, a tedy aplikace failsafe systému, musíme identifikovat komponenty, které budou touto funkcí osazeny, definovat míru poruchy, na kterou bude systém konstruován a také plán kontrol pro ověření funkčnosti tohoto systému. (32) První požadavky na aplikaci systému v letectví deklaroval FAA v roce 1950, formou pozměňovacího návrhu pro CAR 3.

4.1 Legislativní rámec

Doplněk, konkrétně pak část 16. (Další podmínky pro provoz bezpilotního letadla) odstavec j) stanovuje, že všechna letadla, kromě letadel s MTOW menší než 0,91 kg, využívaná pro rekreačně sportovní účely, musí být osazena tímto bezpečnostním systémem, který při selhání řídicího a kontrolního spoje provede ukončení letu. (5)

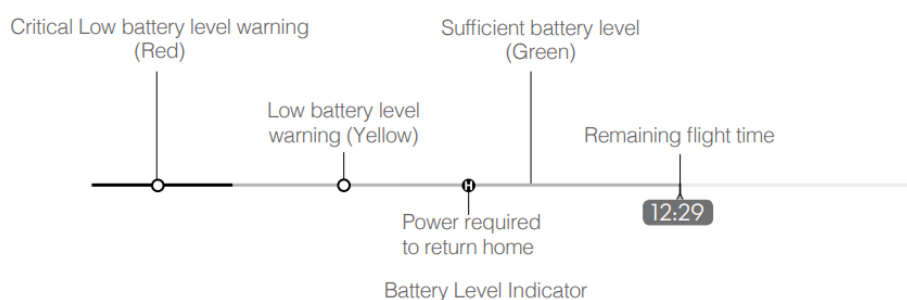
Ačkoliv Doplněk jasně zakazuje let autonomního bezpilotního letadla, let „Return-to-Home“ (dále jen RTH) nečiní z bezpilotního letadla autonomní letadlo, ale jedná se o autonomní fázi

letu RPA. (9) Problematika RTH při aktivaci failsafe má 2 roviny: ochrana třetích osob, majetku a životního prostředí na zemi a ochrana ostatních letadel. ÚCL preferuje, aby ihned po ztrátě signálu letadlo začalo klesat tak, že nejpozději po 20 s sklesá do výšky 150 m nad zemí a následně během dalších 150 s přistane. Od okamžiku selhání do okamžiku přistání tak nesmí uplynout více než 170 s. Pokud má pilot systém failsafe nastaven tak, že po ztrátě signálu se letadlo začne automaticky vracet na místo vzletu, jsou pro dané letadlo povoleny nižší maximální výšky letu (120 m nad zemí) a časový limit pro přistání zkrácen na 120 s. Tato opatření chrání případná kolidující pilotovaný provoz a mají zabránit situaci, kdy se blíží jiné letadlo právě v době selhání řídicího signálu a pilot UA se tedy nemůže tomuto provozu dle pravidel vyhnout. (22)

4.2 DJI Return-to-Home

Aplikace failsafe struktury ve svých letadlech implementuje jejich výrobce DJI jako RTH. Jejím hlavním účelem je automatický návrat letadla, bez případné nutnosti samotného zásahu pilota, na místo vzletu³. Funkce RTH pracuje ve 3 provozních módech.

1. Inteligentní RTH – letadlo zahájí návrat po přímém pokynu pilota. Při tomto kroku je k dispozici dostatečný signál GPS a lze manévry kdykoliv ukončit.
2. RTH pro nízkou kapacitu baterie – v závislosti na kapacitě baterie, výšce a vzdálenosti od místa vzletu dochází k přepočtům letadla, na základě kterých je stanovena minimální kapacita baterie, za které je automaticky zahájen návrat na místo vzletu. V čase 10 s před automatickým zásahem do řízení je pilot opakovaně upozorněn na výše zmíněnou skutečnost.



Obrázek 3 – schéma DJI RTH

³ Místo vzletu je primárně nastaveno jako GPS pozice, ze které letadlo zahájilo let. V provozním manuálu je toto místo označováno jako „Home Point“. Pozici tohoto místa lze ovládacím rozhraním měnit manuálním zásahem do uživatelského rozhraní. Změna tohoto místa je vztažena k pohybu pilota, resp. ovladače letadla během samotného letu a při inicializaci RTH dochází k návratu k místa výskytu ovladače, nikoliv zaznamenané GPS pozice vzletu.

3. Failsafe RTH – v případě úspěšné lokalizace místa vzletu, silného signálu GPS a správně funkce integrovaného kompasu letadla je letadlo schopno plně automatického návratu při výpadku přenášeného signálu (3 s v případě užití dálkového ovladače, 20 s při použití mobilního zařízení a standardního Wi-Fi přenosu). Výrobce doporučuje převzetí pilotáže letadla při podmínkách, kdy dojde k opětovnému navázání spojení a pilot může pokračovat v zamýšleném letu. (33)

Nezbytný parametr správné funkce RTH je nastavená výška návratu, do které má letadlo vystoupat, případně sklesat, a ve které je dosažen návrat nad místo vzletu. Tuto výšku je nutné zvážit před každým letem, především v závislosti na prostředí, ve kterém je let proveden a velikosti případných bariér. Ačkoliv je letadlo DJI Spark, tak jako většina letadel tohoto výrobce, osazeno optickým snímáním 3D okolí, ve vzdálenosti větší než 100 m od místa vzletu a předpokladu vyvinutí přednastavené rychlosti letu 10 ms^{-1} není schopno úhybných manévrů před překážkami. Při vzdálenosti menší a zároveň dobrých světelných podmínkách je letadlo schopno překážky detekovat a zároveň se jim vyhýbat. Takovýto manévr je přesně definován v následujících krocích: model sníží rychlost, pokud je překážka ve vzdálenosti 5 m, dále se zastaví a přejde do visu, po kterém začne letět v obráceném směru po dobu, kterou snímač vyhodnotí jako bezpečnou v kontextu nebezpečí nárazu do okolních překážek. Letadlo poté začne stoupat a zároveň dojde k obnově procesu návratu domů.

Systém RTH tedy funguje v následující posloupnosti:

- a) navázání spojení GPS – definování polohy bezprostředně po vzletu,
- b) inicializace RTH prostřednictvím jednoho ze tří režimů provozu,
- c) potvrzení a úprava letové dráhy letadla,
- d) v závislosti na režimech RTH:
 - I. model sklesá, případně vystoupá (záleží, zda se letadlo nachází v letové výšce pod či nad výškou návratu, kterou si pilot před letem nastavil), na přednastavenou výšku pro návrat domů a poté poletí na výchozí bod, přičemž tento bod se od polohy letadla musí nacházet dále než 20 m,
 - II. pokud je model ve vzdálenosti mezi 3 až 20 m od výchozího bodu a letí ve výšce 2,5 m nebo výše, vrátí se na výchozí bod v aktuální letové výšce, jelikož je poloha letadla vyhodnocena jako k pilotovi bezprostřední, a tudíž je upřednostněno přistání, nežli automatický let na přesné místo vzletu (pokud je povolena možnost RTH a Current Altitude),
 - III. pokud letí ve výšce nižší než 2,5 m, vystoupá na úroveň 2,5 m (v případě, že možnost RTH a Current Altitude není povolena, letadlo automaticky přistane,

když je ve vzdálenosti 3 až 20 m od výchozího bodu a pokud se spustí funkce pro návrat domů a letoun je méně než 3 m od výchozího bodu,

- e) při dosažení polohy nad místem vzletu přejde letadlo do visu, a to ve výšce 0,3 m nad zemí, kde čeká na potvrzení pilota pro přistání a vypnutí motorů. (33)

Praktický experiment, jehož realizace a evaluace je popsána v kapitolách níže, klade nároky také na ostatní zabudované funkce letadla, které s RTH úzce souvisí a jsou do značné míry kooperujícími systémy. Jedná se například o funkci vyhýbání se překážkám při automatickém návratu, kdy může Spark detekovat překážky a pokusit se jim aktivně vyhnout za předpokladu vhodných světelných podmínek. Jakmile letadlo detekuje překážku, pracuje v následující posloupnosti úkonů:

1. letadlo zpomalí, je-li detekována překážka ve vzdálenosti 5 m před přídílí letadla,
2. letadlo se zastaví, přejde do visení a poté letí zpět, dokud 3D senzorový systém již nezaznamená žádnou překážku,
3. letadlo poté bude kolmo stoupat po dobu přibližně 5 s,
4. automatický návrat RTH se poté obnoví a letadlo pokračuje na místo vzletu v aktuální výšce. (33)



Obrázek 4 – vyhýbání se překážkám při RTH (zdroj: autor)

5 Experiment

Tato kapitola bude popisovat experimentální část práce, která byla realizována za účely sběru dat pro jejich následné vyhodnocení. Záměrem je seznámit čtenáře s metodikou, jakou byla praktická část prováděna a zároveň popsat prostředky, které byly při praktické realizaci použity.

5.1 Technická specifikace letadla

Pro testovací lety bylo zvoleno letadlo DJI Spark. Jedná se o nejmenší multikoptéru od firmy DJI disponující stabilizovanou kamerou, inteligentními letovými režimy a systémy detekce překážek. V porovnání s ostatními UA se Spark svou hmotností a rozměry řadí mezi malá letadla. Mezi základní vybavení letadla patří 3D senzor pro identifikaci překážek a eliminaci srážky s nimi. Letadlo je vybaveno softwarem, díky kterému disponuje letovými režimy a širší variabilitou ovládání.

Tabulka 5 – specifikace letadla (34)

ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
Rozměry:	143 x 143 x 55 mm
Provozní hmotnost:	300 g
Maximální rychlost letu:	13,8 ms ⁻¹ (50 kmh ⁻¹)
Stoupání / klesání:	3 ms ⁻¹
Satelitní systémy:	GPS + GLONASS
Detekce překážek (horizontální):	0,2 – 5 m
Detekce překážek (vertikální):	0 – 8 m
Kamera:	CMOS 1/2,3"; 12 Mpix; 25 mm; 3968 x 2976 mm
Přenos obrazu:	720p do 2 km
Gimbal:	Od -85° až 0°
Akumulátor (letadlo):	LiPo 3S; 1480 mAh; 11,4 V
Akumulátor (vysílač):	2970 mAh; 3,7 V
Provozní čas:	16 minut (rychlost 20 kmh ⁻¹), 15 minut (při visení)
Provozní frekvence:	2,412 – 2,462 GHz; 5,745 – 5,825 GHz

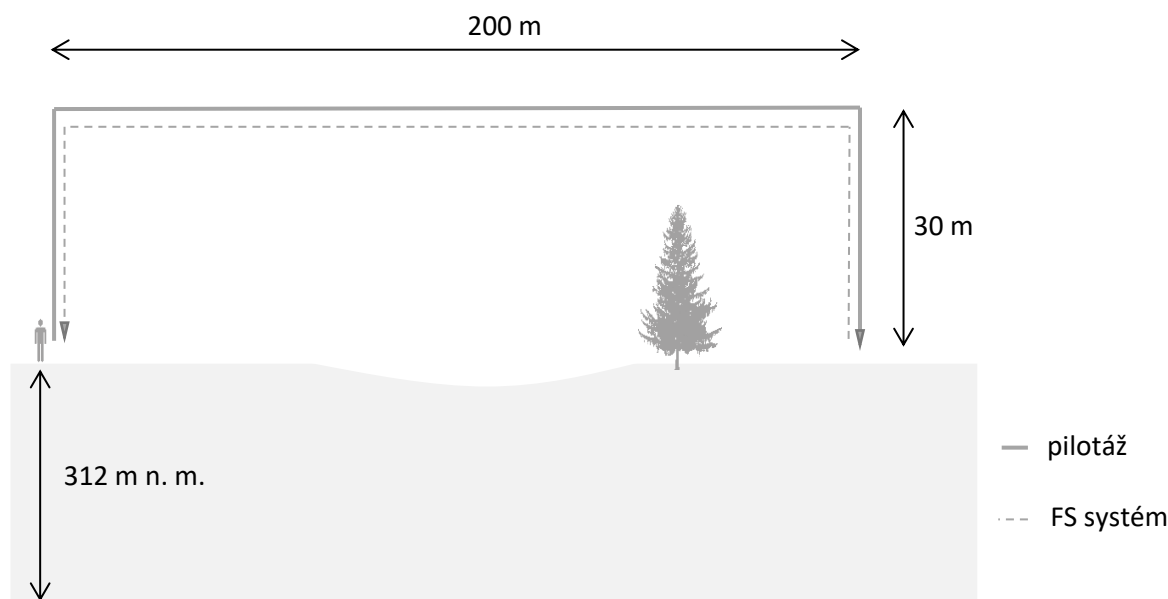
Co se jednotlivých letových režimů týče, v zásadě se jedná o dva základní, jež jsou pro většinu letů užívány. V režimu „Positioning“ (P Mode) je letadlo, za předpokladu dostatečně stabilního signálu GPS⁴ a zapnutých systémů detekce překážek, bezpečné pro provoz, jelikož je schopno automatické stabilizace během letu. Pokud pilot v daném okamžiku neovládá letadlo, tedy není funkční žádný ovládací prvek dálkového rozhraní, drží letadlo ve visu a stabilní poloze. Funkce tohoto systému je bezpečná pro provoz i s okolním větrem, a to do rychlosti 10 ms⁻¹. Pokud je signál GPS slabý, dojde k jeho výpadku a současně je úroveň osvětlení okolního prostředí nízká (tzn. nedostatečná pro správnou činnost předního a spodního systému detekce překážek), přejde letadlo automaticky do režimu „Attitude“ (ATTI), kdy využívá především senzory souhrnně označované jako „Visual Positioning System“ (VPS). Při přechodu na tento systém neprovádí letadlo kontrolu polohy skrze družice, ale senzory založené na vizuální bázi. (33) (35)

Druhým letovým režimem je sportovní režim „Sport Mode“ (S Mode). Pro stabilizaci v tomto režimu letadlo rovněž využívá GPS. Aktivace tohoto režimu automaticky vypne přední systém detekce překážek a další uživatelské funkce, určené především pro pořizování videozáznamu (Pano Mode, ShallowFocus). (33) Při letu ve sportovním režimu disponuje letadlo ostřejší reakcí na příkazy pilota prostřednictvím ovladače, zrychlí se nástup výkonu a letadlo je schopno dosáhnout vyšších letových rychlostí.

5.2 Modelová situace

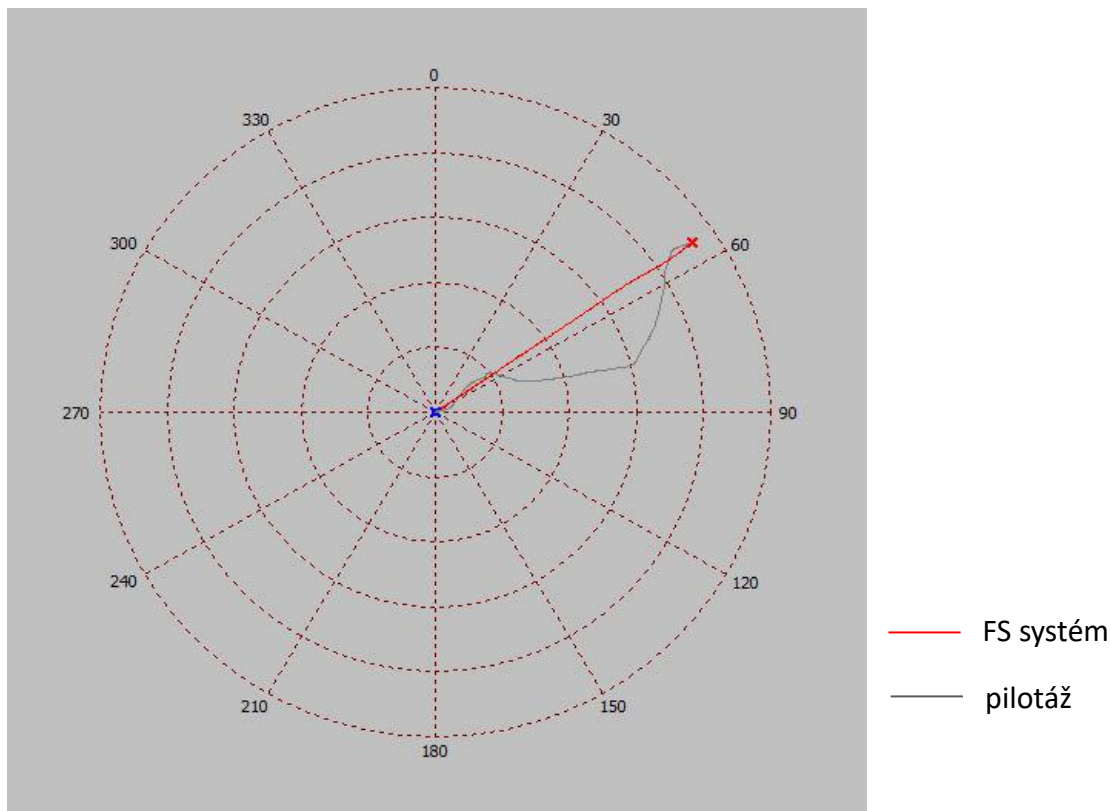
Pro ověření spolehlivosti failsafe systému a měření dalších parametrů, které s jeho funkčností souvisí, je definována modelová situace, která bude experimentem realizována. Základním požadavkem na konstelaci jednotlivých prvků provozních podmínek a prostředí je reálnost společně s použitelností v reálném provozu. Mezi další stěžejní podmínku patří dodržování právních předpisů, především Doplnku X a s tím související povinnosti, především zabezpečení ochrany osob a majetku na zemi, stejně tak, jako okolního letového provozu. V rámci realizace bylo provedeno 100 modelově podobných letů (pokusů). Během každého letu byla zaznamenávána data z telemetrie letadla a měřeny veličiny, vycházející z vnějšího prostředí – počasí, vzdálenost, rychlost a čas. Situační zasazení mělo za účel splnit nároky nejen na variabilitu jednotlivých vstupních proměnných v rámci každého letu, ale také fyzické překážky, simulující různorodost prostředí pro let bezpilotního letadla, především v kontextu rušení přenášeného signálu.

⁴ Letadlo potřebuje pro stabilní signál minimálně 6 satelitů navigačního systému GPS a/nebo GLONASS. Pro bezpečný let výrobce doporučuje stabilně přijímaný signál alespoň z 11 družic.



Obrázek 5 – schéma testovacího letu (zdroj: autor)

Každý let provedený na základě experimentu trval, v závislosti na rychlosti a směru větru, přibližně 3,5 min. Jednotlivé letové dny byly úmyslně voleny na základě předpovědi počasí pro dosažení široké palety podmínek ovzduší. Náročnost experimentu v podobě jeho celkové délky umožnila srovnání charakteristik letadla, resp. jejich variabilitu, napříč jednotlivými ročními obdobími. Letová oblast pak byla vymezena myšleným kvádrem v prostoru o rozměrech 200 x 50 x 30 m. Uvnitř myšleného kvádrů ve vzdušném prostoru třídy G není situován žádný typologický prostor vzdušné infrastruktury (nejblíže: LKZD Žatec Macerka – 12,5 km, CTR Karlovy Vary – 19,7 km). Základní charakteristiky jednotlivých letů jsou prostřednictvím tabulek uvedeny v přílohách. Pilotáž se skládala z 6 částí. Téměř v každé části docházelo ke změně letového režimu. Pro účel vzletu bylo ve většině letových případů užito asistovaného startu, kdy letadlo samo spustí elektromotory a na základě prostředí nastaví optimální rychlost otáček vrtulí pro vzlet. Ve výšce zhruba 1 m je poté pilot vyzván k plnému převzetí kontroly. Po této části je pilotáž již plně v rukou pilota. Při většině letů bylo letadlo uvedeno do tzv. „sportovního módu“, který zosťří reakce na pokyny pilota, zvýší rychlost otáček a celkovou rychlost pohybu letadla. Vyšší rychlost a ostřejší reakce také umožňovaly dosáhnout rozumného kompromisu mezi počtem realizovaných letů za čas a počet baterií. Po letu v předem vytyčeném koridoru, nad překážkami a dosažení požadovaného místa přistání došlo ke kontrolovanému sestupu do výšky zhruba 0,3 m a inicializaci RTH. V této fázi letu pak bylo letadlo sledováno jak vizuálně, tak pomocí telemetrie přenášené na vysílací stanici. Při úspěšném návratu nad místo vzletu byla naměřena odchylka mezi místem vzletu a místem přistání letadla.



Obrázek 6 – polární graf letu (zdroj: autor)

5.3 Měřené veličiny

Sběr veličin, jehož rozsah je důležitý pro komplexnost ve stanovení přesnosti pilotáže UAS, probíhal především pomocí telemetrie, případně externím měřením. Mezi zařízení tvořící součást palubního telemetrického systému patří především barometr, přijímač GPS, jednotka IMU a v neposlední řadě kompas. Telemetrické moduly tvoří pár, z něhož je jeden – palubní – napojen na datovou sběrnici v letadle a druhý – pozemní – v radiovém ovladači na zemi. U letadla jsou tedy data zobrazována jak v reálném čase – na displeji ovladače OSD (On Screen Display), tak ukládána v jednotce letadla. Díky tomuto systému lze s daty později pracovat a analyzovat téměř všechny parametry letu a zásahy pilota do pilotáže letadla. Sběr dalších dat, označen jako externí, probíhal pomocí zařízení, která buď nejsou zabudovaná v UAS a nejsou tak vyhodnocována implementovanou telemetrií, nebo zabudována jsou a externí měřicí zařízení slouží pro jejich kontrolu a ověření přesnosti.

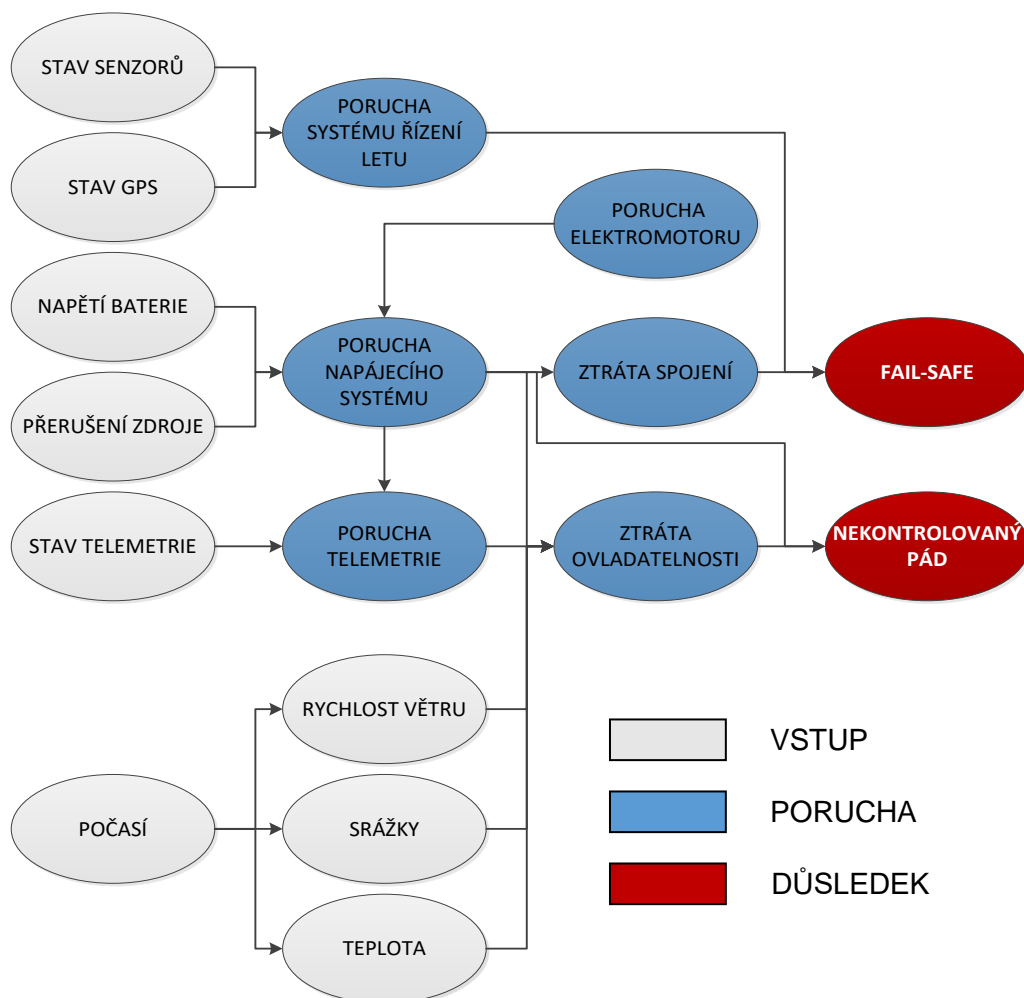
Tabulka 6 – seznam měřených veličin

Veličina	Jednotky	Telemetrie	Externí měření	Použito v analýze
Čas letu	sekundy	A	A	A
Kalibrace	-	A	A	A
Klonění	stupně	A	N	N
Klopení	stupně	A	N	N
LAT	stupně	A	N	A
Letový režim	-	A	N	A
LON	stupně	A	N	A
Napětí baterie	volty	A	N	A
Odchylna přistání	metry	N	A	A
Počasí	-	N	A	A
Počet satelitů	-	A	N	A
Rychlost	metry za sekundu	A	N	N
Směr letu	stupně	A	N	A
Srážky	-	N	A	A
Stav baterie	procenta	A	N	A
Teplota	stupně celsia	N	A	A
Varování	-	A	N	A
Vítr při přistání	metry za sekundu	N	A	A
Vítr při vzletu	metry za sekundu	N	A	A
Vychýlení ovládacích ploch	stupně	A	N	N
Vychýlení ovladače (klonění)	stupně	A	N	N
Vychýlení ovladače (klopení)	stupně	A	N	N
Výška	metry	A	N	A

Jedná se o měření času pomocí elektronických stopek zabudovaných v Samsung Galaxy Smartwatch, rychlosti větru pomocí anemometru Benetech GM816 (garantovaná přesnost $\pm 5\%$ při rychlostech větru $0-30\text{ ms}^{-1}$), jež je rovněž schopen měření aktuální venkovní teploty ($\pm 2\%$ přesnost) a měření odchylky ve vzdálenosti při přistávání (pomocí svinovacího metru). Měření výskytu srážek, celkového stavu počasí a oblačnosti neprobíhalo pomocí žádného zařízení – byla použita data ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) a kalibrace (kompasu a jednotky IMU (Inertial Measurement Unit)) vychází z logického parametru zkalibrováno či nezkalibrováno.

5.4 Letadlo jako systém

Před analýzou dat naměřených v praktické části, je nutné definovat systém letadla jako celku, tedy množinu základních subsystémů, na jejichž stavu je přímo závislé bezpečné provedení letu a jejichž porucha či ztráta vede k vážným důsledkům. Základní subsystémy vychází jak z vnitřního prostředí – vybavení letadla, tak vnějšího – okolní prostředí definované počasím, polohou, atd. Stanovení jednotlivých prvků, následně použitých k analýze jednotlivých rizik, vychází z testovacích letů a místní identifikace možných rizik, a to přímo pilotem.



Obrázek 7 – schéma prioritních subsystémů

6 Vyhodnocení dat a analýza rizik

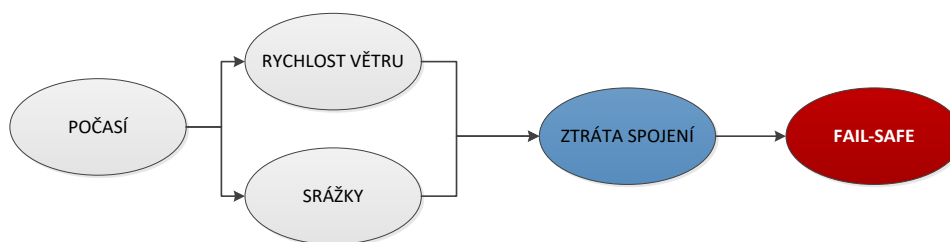
V této kapitole je pojednáváno o vyhodnocení naměřených dat. Mezi základní vyhodnocované parametry patří přesnost letadla, vzájemná závislost jednotlivých charakteristik a rizika, odvíjející se od subsystémů letadla, definovaných v kapitole 5.4. Vyhodnocení všech charakteristik vytváří ucelený obraz o celkové spolehlivosti systému, odvozené od realizovaného experimentu.

6.1 Interpretace naměřených dat

Během testování byly měřeny charakteristiky různé povahy. Na jejich základě a vzájemné komparaci lze hledat případné závislosti, které vytváří celkově ucelené obrazy letů a do jisté míry vysvětlují důvody, díky kterým kterých je letadlo kupříkladu hůře ovladatelné nebo se zhoršují jeho letové charakteristiky.

6.1.1 Let č. 71, 76 a 77

Úvodem kapitoly bude zmíněn 8. letový den, jelikož je s jeho odkazem v pozdějším vyhodnocení dat dále pracováno. Tento letový den byl v rámci konečné bilance výzkumu vyhodnocen jako nejkritičtější. Během 8. letového dne došlo následkem špatných povětrnostních podmínek k nejkritičtějšímu úseku celého experimentu. Systém failsafe, který je předmětem zkoumání, vykázal ve 3 letech (z celkových 10) v rámci tohoto dne, nesprávnou funkci. Anomálie v chování letadla, která nevedla k nehodě, nýbrž incidentu, jehož důsledkem nebylo ani zničení letadla, ani jakékoliv zranění osob či poškození majetku, spočívala ve ztrátě spojení letadla a radiového ovladače, po kterém následovala inicializace systému failsafe, dle správné posloupnosti aktivování příslušných systémů. Následný proces, jakým byla aktivace systému failsafe následována, neodpovídal jak postupům, které udává výrobce, tak nastavení systému, kterým letadlo před samotným experimentem prošlo.



Obrázek 8 – schéma incidentu

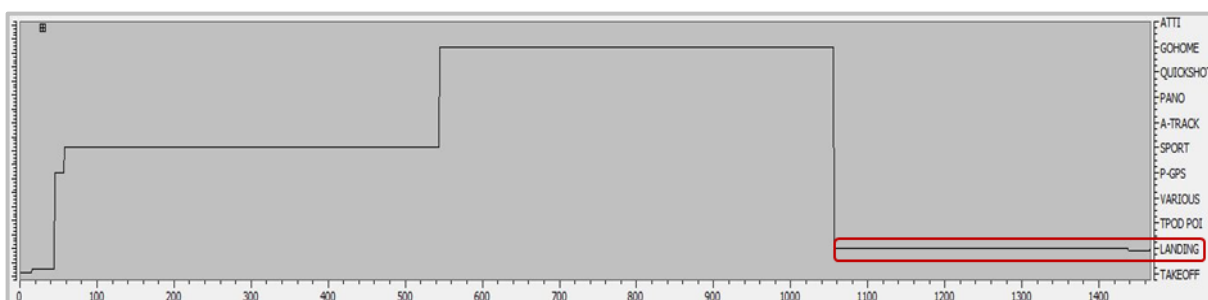
6.1.2 Přesnost

Přesností návratu letadla je myšlen rozdíl mezi zemskou polohou, ze které vzlétlo, od polohy, do níž letadlo přistálo. Vzhledem k principu činnosti zabudovaného systému failsafe (viz. kapitola 4.2) by letadlo mělo přistát v poloze stejné, ze které vzlétlo, a případné odchylky, které spočívají v rozdílu vzdálenosti těchto dvou bodů, stanovíme celkovou přesnost. Počáteční statistika přesnosti přistání (tabulka 7 – procentuální přesnost přistání) poukazuje na to, že více jak polovina letů skončila úspěšným přistáním do perimetru 1 m od místa vzletu.

Tabulka 7 – procentuální přesnost přistání

Velikost perimetru	Poměr letů ⁵
1-100 cm	55 %
101-200 cm	14 %
201-300 cm	16 %
301-804 cm	12 %

S odkazem na povahu experimentálních letů, ale také provozní praxi, je naměřená přesnost dostačující. Pro hodnocení výsledné spolehlivosti a schopnosti letadla plnit požadované úkony a funkce byla stanovena 10 m velikost perimetru. V definování této velikosti byl zohledněn jak celkový perimetr letové činnosti (výška letu, délka letu), velikost letadla, stav okolního prostředí, tak vzdálenosti definované v Doplnku X. I přes rozdíly téměř 8 m je důležité vzít v potaz rozmanitost provozních podmínek, od kterých se odvíjí schopnost sensorických systémů pracovat v přijatelné úrovni přesné pilotáže. Dalším důležitým hlediskem při pohledu na procentuální úspěšnost je celkový čas, po který proces návratu trvá.



Obrázek 9 – průběh letových režimů

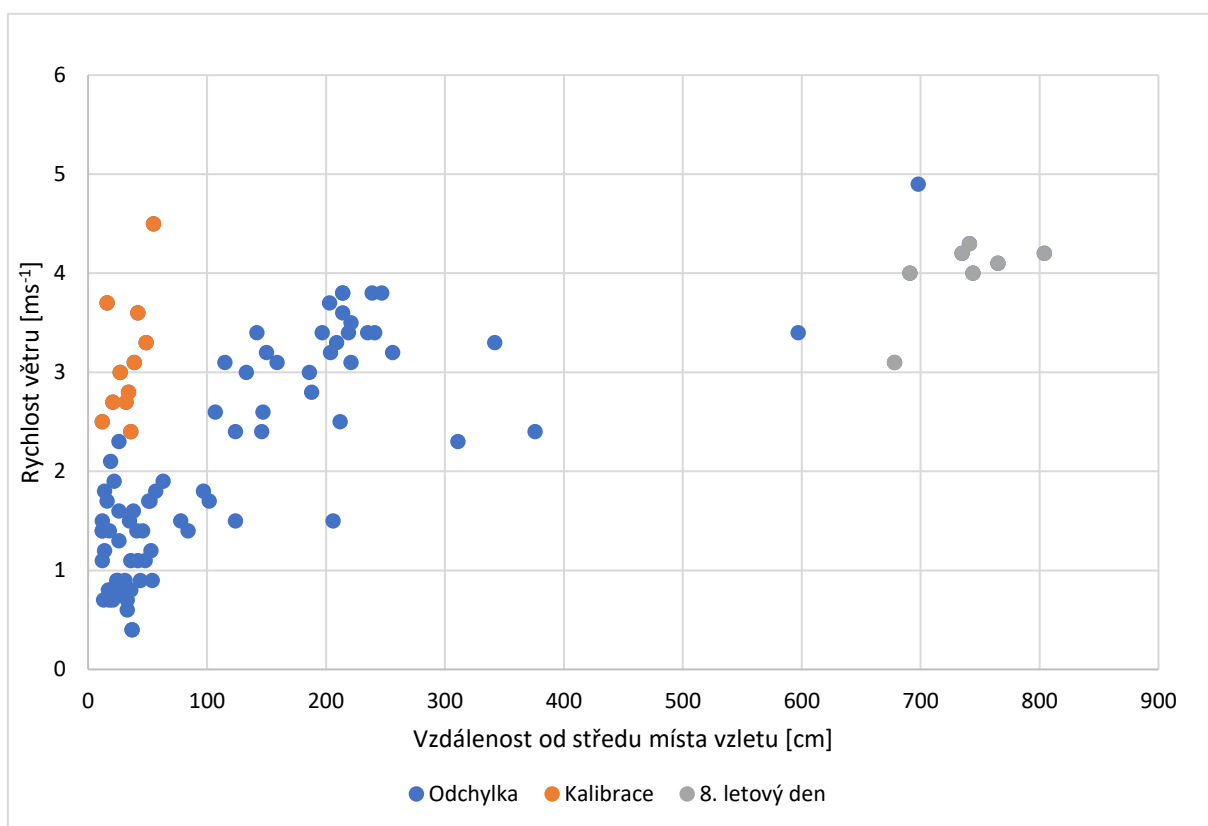
Pokud tedy hodnotíme systém bezpečného návratu jako systém nouzový, který za specifických podmínek vykazuje přesnost přistání v rozpětí metrů výše zmíněných, je

⁵ Celkově provedeno 97 měřitelných přistání (viz. 6.1.1).

vzhledem k času, prezentovaném na ose x obrázku 9, je evidentní, že pilot disponuje dostatkem časové rezervy pro zpětné převzetí pilotáže a zvýšení pravděpodobnosti vyšší přesnosti přistání.

V rámci přesnosti bylo rovněž předmětem zájmu zkoumání závislosti na ostatních měřených veličinách. Prokázání závislosti přesnosti přistání letadla na parametrech, jakými jsou kupříkladu rychlost větru při přistání, případně počet satelitů, ze kterých letadlo přijímá signál, pomáhá k identifikaci důvodů, ze kterých případná nepřesnost vznikla. Tyto měřené veličiny navíc mohou posloužit při analýze rizik, které je v této práci věnována kapitola.

Graf 2 – závislost na větru

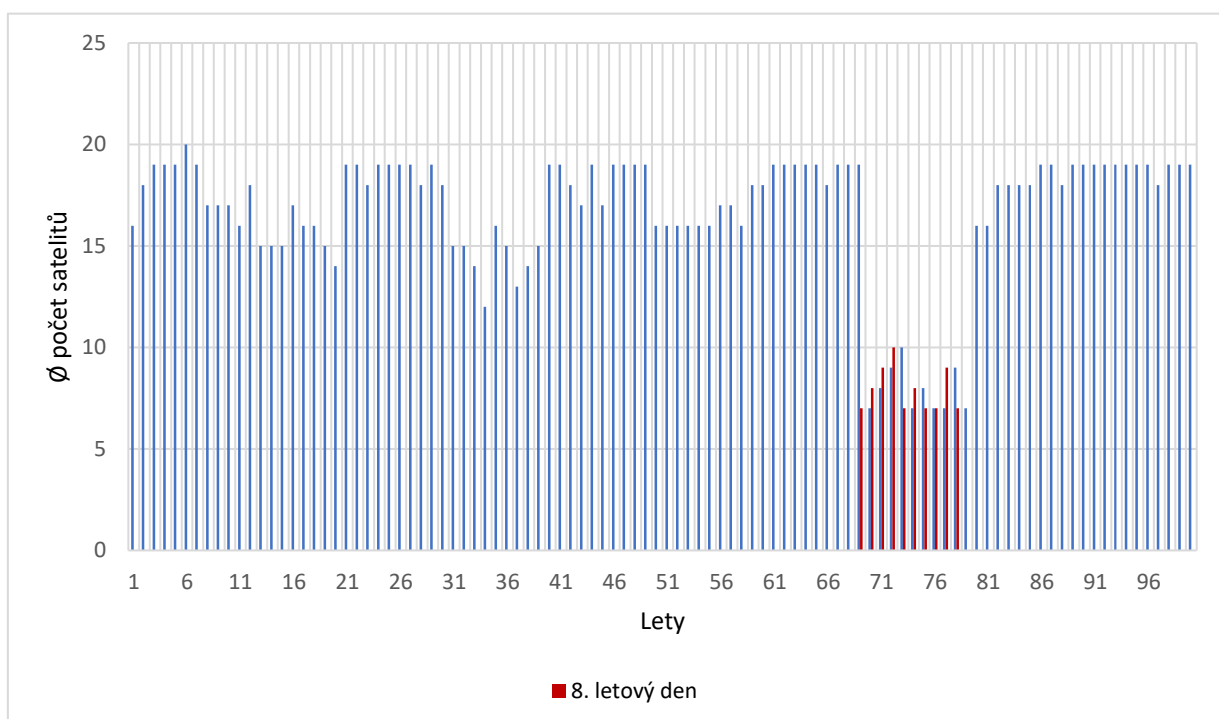


Graf 2 – závislost na větru ukazuje výsledné odchylky při realizovaných přistání v závislosti na rychlosti větru. V rámci metodiky měření byl vítr měřen v azimutu korespondujícím se směrem letu, tedy 55° a to 1,5 m nad zemí, přesně ve chvíli, kdy se letadlo rovněž v této výšce (během přistávacího manévru) nacházelo. V datové oblasti jsou barevně rozlišeny 3 barvy. Modře znázorněné výstupy označují naměřené hodnoty bez dalších specifikací. Z umístění v grafu vyplývá, že do rychlosti větru 2 ms⁻¹ Spark dokáže s velkou přesností (perimetr 0–1 m) splňovat požadovaný úkon a systém failsafe se v rámci těchto hodnot nachází na stabilní úrovni výkonnosti. S narůstající rychlostí větru se však zvyšuje odchylka při přistání. Tento vzájemný vztah má přibližný lineární charakter průběhu. Oranžové vynesení datových bodů reprezentuje

přistání, ve kterých letadlo nepřekročilo perimetr 100 cm. Poukazují na data z posledního letového dne, kdy byl v rámci zkušebního záměru letu kalibrován kompas a také IMU letadla. Při letech, kterým kalibrace předcházela, došlo k udržení přesnosti v rámci perimetru 1 m, a to i za podmínek, kdy byla rychlost větru až dvojnásobná.

I přes nepřízeň počasí (kombinace silného větru a oblačnosti) si letadlo dokázalo zachovat přesnost přistání v relativně malém perimetru, přičemž se výrazně zkrátil nejen čas návratu, ale také samotného přistávacího manévru. Graficky značená šedá funkce pak představuje výstupy ze 8. letového dne, kde byly při nepříznivých letových podmínkách zaznamenány kromě 3 poruch letadlového systému také největší odchylky v rámci stanoveného perimetru. Jak je patrné z Přílohy 1, došlo ke kombinaci několika nepříznivých vlivů, především: špatné počasí, nízká oblačnost se srážkami a také počet satelitů, ze kterých byl přijímán signál GPS (graf 3 – počet dostupných satelitů).

Graf 3 – počet dostupných satelitů



V rámci experimentu bylo rozhodnuto o realizaci alespoň několika letů za podmínek srážek a větru o rychlosti větší nežli 2 ms^{-1} . Při samotné pilotáži bylo prokázáno zhoršení vlastností v ovládání letadla, především schopnost letadla setrvat v ustálené poloze – ve visu. Celkem byly prověřeny 4 typy počasí z hlediska oblačnosti a pro účely práce také její definované výše, tedy: J – jasno; SJ – skoro jasno; Z, NO – zataženo s nízkou oblačností (pod 2 km AGL); Z, VO – zataženo s vysokou oblačností (nad 2 km AGL). Měření za počasí „skoro jasno“ bylo u všech měření vždy zaznamenáno při oblačnosti vysoké, proto se pro účely práce její stav

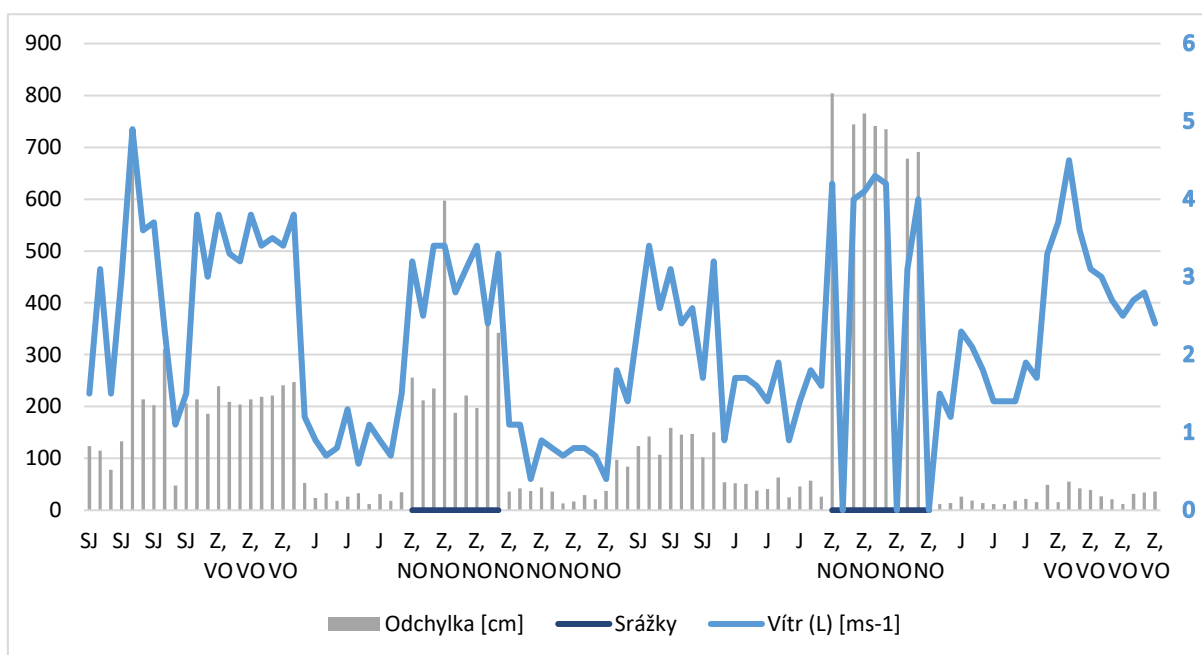
nezaznamenával. Při záznamu srážek napříč jednotlivými dny byl vzhledem k nepřesnému zdroji informací a absenci potřebného přístrojového vybavení zanedbán číselný údaj o úhrnu srážek během letu a zredukován na parametr výskytu či absence srážek. Graf 4 – závislost počasí na přesnosti letu graficky demonstruje dopad nejen stavu oblačnosti, ale také rychlosti větru při přistávání (značeno „Vítr (L)“) na celkové přesnosti letadla. Grafické znázornění naměřených dat ukazuje, že v případech, kdy byl stav oblačnosti jiný než „jasno“, ve kterém dosahovalo letadlo nejlepší průměrné přesnosti, tedy 29,41 cm, docházelo k poměrně velkým odchylkám polohy přistání od polohy vzletu. Pro celkovou objektivitu této skutečnosti byla do grafu zanesena data o výše zmíněné rychlosti větru, jejichž křivka vesměs kopíruje průběh sloupcového zobrazení dat, představujících grafické zobrazení odchylky přistání. U této teze je však nutno podotknout výjimku, jejíž znázornění představuje rozdíl mezi rychlostí větru a přesnosti přistání v pravé části grafu. Situace, kdy je vzdálenost mezi sloupci odchylky a křivkou rychlosti větru nejdelší, odkazuje na poslední letový den, při kterém došlo k manuální kalibraci kompasu a IMU.



Obrázek 10 – proces kalibrace (33)

I přes průměrnou rychlost větru odpovídající $3,12 \text{ ms}^{-1}$ nedošlo k relativnímu zhoršení přesnosti, kterou si letadlo zachovalo na průměrné hodnotě odchylky 33 cm. Z této skutečnosti vyplývá, že za předpokladu správně kalibrovaného kompasu lze výrazně snížit nepřesnost v pilotáži palubního systému, ačkoliv systémová jednotka, která stav těchto zařízení kontroluje, v předešlých letech, ani v letu diskutovaném, ke kalibraci na základě zhoršeného stavu senzorů nevyzývala.

Graf 4 – závislost počasí na přesnosti letu



S odkazem na graf 4 – závislost počasí na přesnosti letu, ale také graf 3 – počet dostupných satelitů je tedy nutno konstatovat prokázanou závislost mezi stavem počasí, přesností manévru letadla a stavu navigačního systému, kdy hovoříme o výše zmíněném 8. letovém dni, zatíženém třemi selháními failsafe systému letadla. Případnou závislost jednotlivých vstupních parametrů na srážkách nelze jednoznačně konstatovat. Z hlediska dopadu na přesnost nelze rovněž stanovit jasný výsledek, vzhledem k tomu, že se díky povaze počasí napříč ročními obdobími vyskytly pouze srážky dešťové a nejednalo se o podmínky vyloženě extrémní ve smyslu hustého deště. I přes to však letadlo dokázalo létat v dešti, za absence jakýchkoliv prvků zvýšené ochrany a certifikace elektroniky. Zároveň nedošlo, především v elektromotorech, k jakýmkoliv poruchám plynoucích z vlhkosti okolního prostředí.

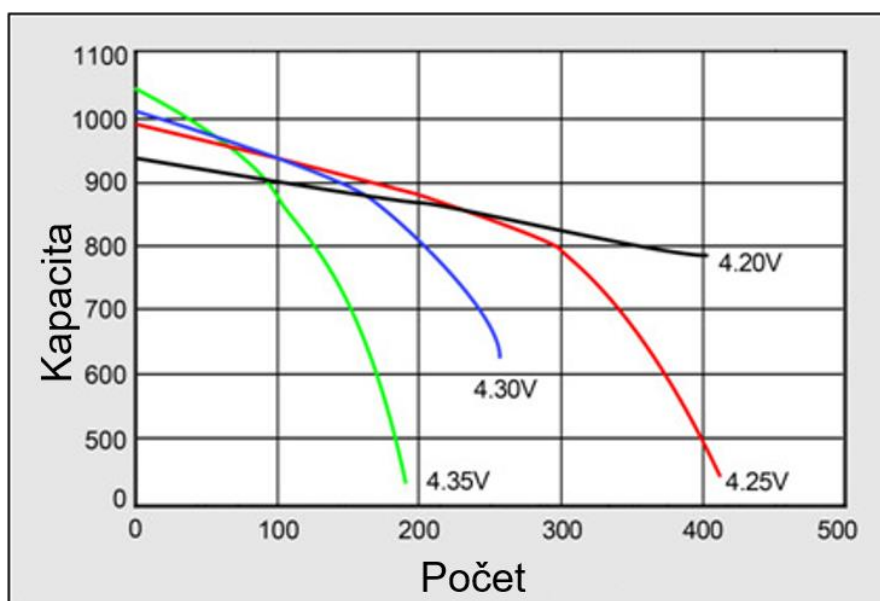
6.2 Analýza rizik

Analýza rizik této práce bude vycházet z metodiky ICAO Doc 9859 (SMM), konkrétně její kapitoly 2.14 (Safety Risk). Předmětem toho vyhodnocení (a také definice rizik) budou jak subsystémy letadla definované v kapitole 5.4, tak ostatní rizika, která byla identifikována v průběhu experimentálních letů a budou tedy vztažena na konkrétní podmínky, vycházejících z realizace experimentu. Každá skupina rizik, resp. její dílčí rizika bude číselně ohodnocena a kvantifikována. Na rozdíl od metodiky ICAO nebude značení při ohodnocení dopadu formou písmena, nýbrž také čísla, za účely právě zamýšlené kvantifikace významovosti jednotlivých rizik. Výsledné hodnoty tedy budou demonstrovat hodnoty uvedené v tabulce 2 –

pravděpodobnost bezpečnostních rizik pro definování pravděpodobnosti výskytu a v tabulce 3 – dopady bezpečnostních rizik. Pro tabulku dopadů tedy dojde ke změně z písemného na číselné označení stupně opadu (tzn.: katastrofální – 5 (A), zanedbatelný 1 (E)).

6.2.1 Napájení

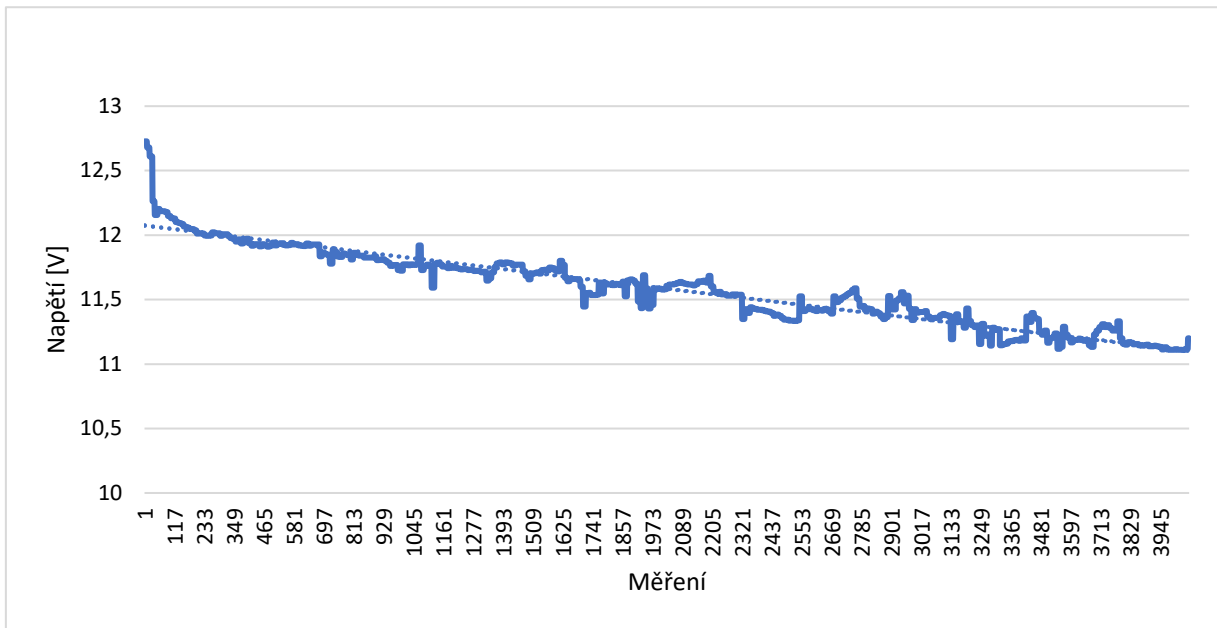
Napájecí systém letadla je tvořen akumulátory s označením „Intelligent Flight Battery“. Pro zvýšení bezpečnosti letu disponují baterie firmwarem pro ochranu napájecí soustavy letadla za různých provozních stavů. Čelní strana baterie obsahuje 4 LED diody, které slouží jako indikátory různých stavů baterie i celého systému, včetně diagnostiky poruchy. Důležitým prvkem ochrany a jednou z důležitých funkcí je rovněž kontrolované vybíjení. Pokud se mezi provozem letadla (testovacími lety) vyskytl delší časový interval, došlo k jejich automatickému vybíjení za účelem prodloužení životnosti baterie. Vzhledem k typu baterie je životnost ovlivněna rovněž celkovou kapacitou a počtem cyklů.



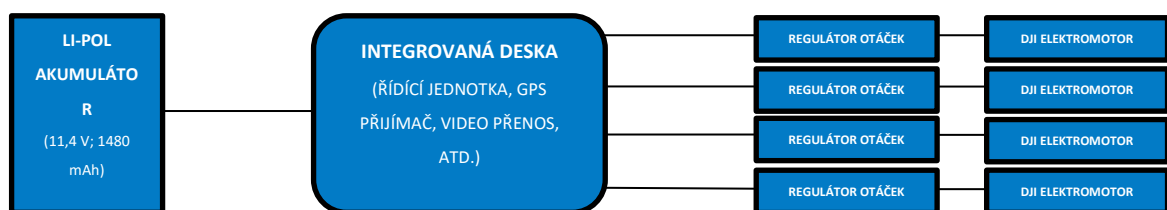
Obrázek 11 – životnost Li-Po baterií (36)

Během testování byly použity 3 akumulátory. Vzhledem k povaze měření bylo na každý akumulátor létáno přibližně 33 letů, tedy 33 cyklů, přičemž se každý cyklus skládal z různých provozních módů zatížení elektromotorů (vzlet, dopředný let, vis, přistání).

Graf 5 – průběh napětí akumulátoru za letu



V každé sérii letu vykazovaly baterie stabilní provozní výsledky jak v oblasti průběhu napětí, tak konstantního vybíjení akumulátoru. Rozdíl v čase výdrže baterií se mezi prvním a posledním letem zřetelně neprojevil. Byla zaznamenána změna stavu v teplotě jednotlivých článků. Teplotní průběh ve člancích akumulátorů a jeho variabilita byla dána především okolním prostředím a rozdílem teplot v jednotlivých letových dnech, nikoliv disfunkcí způsobenou opotřebením jednotlivých článků. Schéma alokace baterií v rámci schéma zapojení elektroinstalace popisuje obrázek 12 – zjednodušené blokové schéma zapojení elektroinstalace.



Obrázek 12 – zjednodušené blokové schéma zapojení elektroinstalace (27)

Celkovou dobu životnosti jednoho akumulátoru nelze jednoznačně stanovit. V průběhu provozního cyklu dochází k postupnému snižování délky výdrže a maximální kapacity baterie. Výrobce životnost baterie, případně doporučení, při jakém počtu cyklů baterii zcela nahradit, nedeklaruje. Jediný parametr, který výrobce uvádí jako směrodatný, je vztažen přímo k záruce na samotné akumulátory, na něž je záruka zkrácena na 6 měsíců, případně 200 cyklů.

Tabulka 8 – rizika napájecího systému

NAPÁJECÍ SYSTÉM			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
1.	Napětí baterie	4	1
2.	Uvolnění baterie	5	1
3.	Kritický stav baterie	3	3

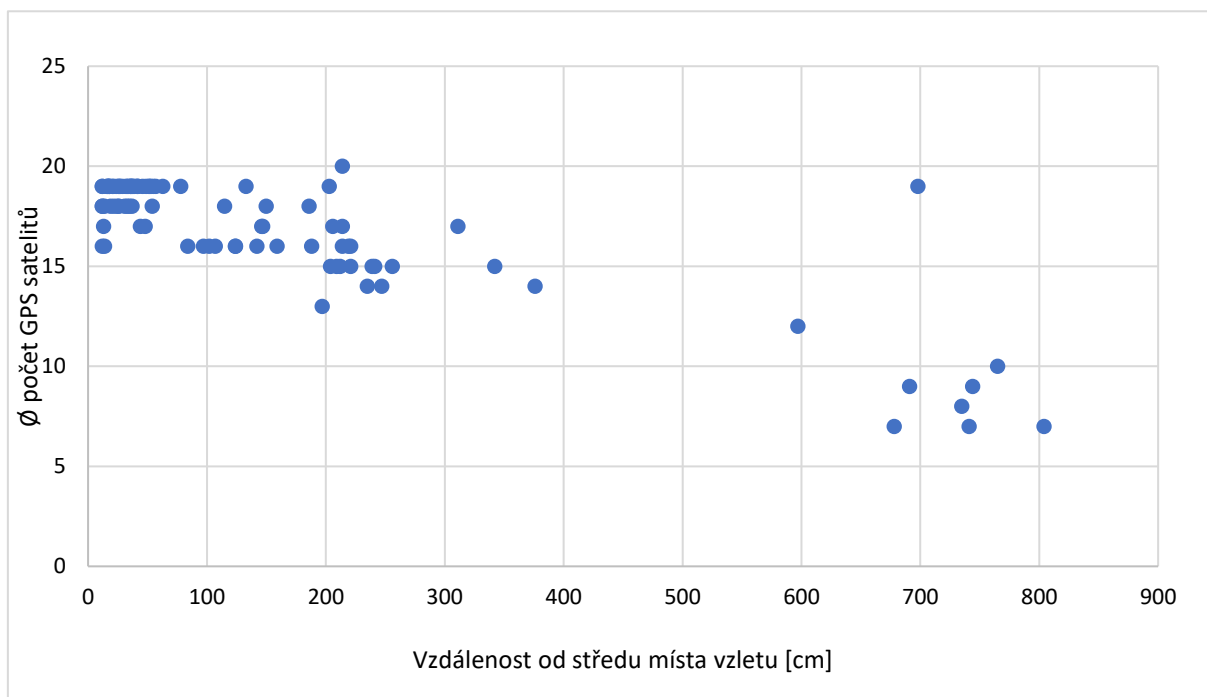
Během letů nedošlo k realizaci žádného z rizik, která jsou spojena s napájecím systémem. Ačkoliv se během experimentu nevyskytly, jejich případná existence by s velkou pravděpodobností zapříčinila nekontrolovatelný pád letadla, v lepším případě okamžité přerušení zamýšlené letové činnosti. Mezi rizika byla zařazena možnost uvolnění akumulátoru. Baterie užívaná v letadle je odnímatelná a tvoří velkou část z celkového objemu letadla. Mechanismus, jež akumulátor připevňuje k trupu, spočívá ve specifickém tvarování hran akumulátoru a pohyblivých ploch, které jsou spojeny s bočními jezdcí, pomocí kterých ho lze odejmout. Při špatné manipulaci lze dosáhnout stavu, kdy je sice akumulátor připojen do napájecího systému letadla, avšak není dostatečně zajištěn upevňovacím mechanismem. Tento stav během letu může vyústit k samovolnému odejmutí baterie, přerušení zdroje a pádu letadla. Mezi další rizika patří rovněž kritický stav baterie, který musí být vyhodnocován jak pilotem, tak telemetrickým systémem. Výskyt tohoto rizika byl ohodnocen střední hodnotou, jelikož je jeho výskyt možné předpokládat při každém letu, stejně tak, jako schopnost pilota se na toto riziko v rámci plánování letu připravit. V případě, že dojde k vybití baterie pod přednastavenou hodnotu, zahájí letadlo, dle situace, návrat na místo vzletu, případně přistávací manévry. Toto riziko díky systému zálohování v podobě výše zmíněné funkce nutně nevede k pádu letadla.

6.2.2 Systém řízení letu

K přesné, a v rámci provozu letadla co nejbezpečnější pilotáži letadla, potřebuje pilot dostatečný počet satelitů GPS, z nichž letadlo přijímá signál. S ohledem na letadlo, které je předmětem této práce hovoříme o letových režimech P – positioning a S – sport. Z hlediska užití GPS pracují oba módy identicky – tedy v obou případech letadlo ke stabilizaci využívá tohoto systému a rozdíl v módech spočívá ve využívání dalších asistenčních funkcí, například vyhýbaní se fyzickým překážkám pomocí optických senzorů. V případě kritické ztráty GPS, tedy degradace systému z důvodu ztráty signálu, dochází k automatickému přepnutí do ATTI módu a dochází ke ztrátě automatické stabilizace. Z diagnostiky pomocí telemetrie vyšlo najevo, že nejmenší počet satelitů, ze kterých letadlo v reálném čase přijímalo signál a za

kterého byl let realizován, byl dne 23. 2. 2019 počtem 7. Během tohoto dne, ani dalších letových dnů, však k automatickému přepnutí do módu ATTI nedošlo. V situaci případného spuštění tohoto systému na základě absence dostatečného GPS signálu však hodnotíme dopad jako nebezpečný, jelikož může dojít k razantní změně letového projevu letadla a v kombinaci s dalšími riziky, především počasí, klade pilotáž potřebná k bezpečnému provedení letu mnohem větší nároky na schopnosti pilota.

Graf 6 – závislost GPS na přesnosti přistání



Letadlo DJI Spark může být ovládáno prostřednictvím tří rozhraní. Nejvhodnější způsob pilotáže z hlediska bezpečnosti i přívětivosti uživatelského rozhraní je pomocí RC vysílače, propojeného s OSD, v případě DJI Spark tedy mobilního telefonu s aplikací výrobce. Tato kombinace byla také volena pro potřeby této práce. Další možností pilotáže letadla je užití pouze mobilního telefonu s aplikací výrobce. Pilotáž letadla je v tomto případě umožněna pomocí přenosu Wi-Fi signálu a ovládání skrze dotykového displeje mobilního telefonu. Tento typ ovládání je kromě nižší uživatelské přívětivosti – větší nepřesnosti spočívající v absenci alespoň haptické odezvy ovladače, méně výhodný také z důvodu menšího dosahu přenosu signálu. Poslední možností pro pilotáž je pilotáž pomocí gest, jež jsou snímána kamerovým systémem letadla.

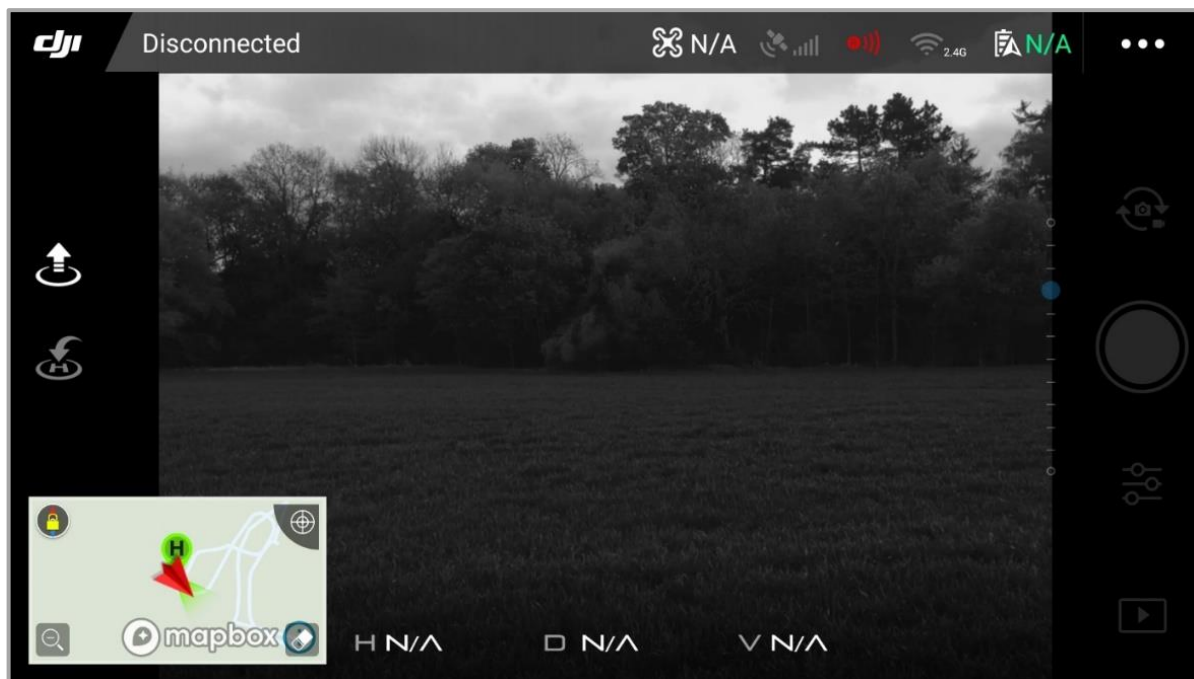
Tabulka 9 – rizika systému řízení letu

SYSTÉM ŘÍZENÍ LETU			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
4.	Počet satelitů <0,6>	4	1
5.	Stav senzorů	5	1
6.	Fyzická překážka při letu	3	5
7.	Absence RC vysílače	3	1
8.	Ztráta přenosu telemetrie	3	4

Telemetrický systém letadla umožňuje sledovat základní, ale i pokročilé údaje o parametrech letu. V rámci testovaného UAS jsou na řídicí stanici přijímány datové výstupy jak v podobě znaků, tak obrazový výstup, podobný systémům FPV. Palubní jednotka a jednotka na RC přijímači nejsou identické. Zásadní rozdíl spočívá především ve výkonu (zhruba poloviční počet mW), díky kterému lze dosáhnout stavu výpadku telemetrického přenosu dat, zvláště v rámci testovacích letů, jejichž součástí byl záměrný let a klesání za fyzickou překážku. V závislosti na poloze letadla v dráze letu docházelo velmi často k výpadkům telemetrie. Tento výpadek lze charakterizovat ve 3 úrovních s pevnou posloupností:

1. ztráta přenosu obrazu pořízeného palubní kamerou,
2. ztráta sekundárních dat (telemetrická data jež nejsou nezbytně nutná pro pilotáž),
3. ztráta primárních dat (letové údaje – výška, rychlost, klonění, klopení).

Ztráta přenosu telemetrických dat (viz. obrázek 13 – ukázka ztráty přenosu na OSD) byla při testovacích letech poměrně častým jevem. Dopad jejich ztráty byl eliminován povahou provozu v rámci platné legislativy – VLOS. Ohrožení v případě výpadku je tedy spíše otázkou schopnosti pilota a odhadu stavu letadla nežli kritickým ohrožením bezpečnosti letu, jako by tomu bylo kupříkladu při provozu BVLOS. Ve většině případů docházelo k výpadku „pouze“ obrazového přenosu, při zachování jak primárních, tak sekundárních informací o letu. Výpadky v přenosu telemetrických dat, definované v 3 úrovni, se také vyskytly, avšak doba, po kterou byl výpadek vždy zaznamenán, odpovídala časovému intervalu 1–3 sekund, během kterých se letadlo nenacházelo v některé z kritických fází letu.



Obrázek 13 – ukázka ztráty přenosu na OSD

6.2.3 Osoby a prostředky zapojené do provozu

Skupina těchto rizik souvisí s oblastí, která je záměrem realizace provozu UAS. Tuzemská legislativa definuje, že let bezpilotního letadla smí být prováděn jen takovým způsobem, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru, osob a majetku na zemi a životního prostředí. Zákaz ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru se neuplatňuje vzájemně mezi modely letadel za předpokladu předchozí dohody zúčastněných pilotů a osob a přijetí přiměřených opatření proti ohrožení bezpečnosti ostatního letového provozu a na ochranu osob a majetku na zemi. (5) Mezi další podmínky⁶ současné patří, že:

1. UA se v průběhu vzletu a přistání zároveň nesmí přiblížit k jakékoliv osobě jiné než jeho pilot na horizontální vzdálenost menší než 50 m,
2. se během letu UA nepřiblíží k jakékoliv osobě, prostředku nebo stavbě, které nejsou součástí předmětného provozu, a to na vzdálenost menší než 100 m,
3. během letu nesmí dojít k přiblížení k jakémukoliv hustě osídlenému prostoru, tedy prostoru, který je ve velkoměstě, městě nebo osadě používán převážně k bydlení, obchodním činnostem nebo rekreaci (37), na horizontální vzdálenost menší než 150 m.

⁶ S výjimkou, kdy ÚCL povolí jinak.

Při odhadu míry dopadu srážky letadla s člověkem můžeme užít fyzikálních výpočtů, kdy kalkulujeme výslednou kinetickou energii, která je způsobena letadlem v době srážky s tělesem. Při modelové situace nárazu při dopředném pohybu letadla platí v rámci Newtonovy mechaniky vzorec pro výpočet kinetické energie:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6.1)$$

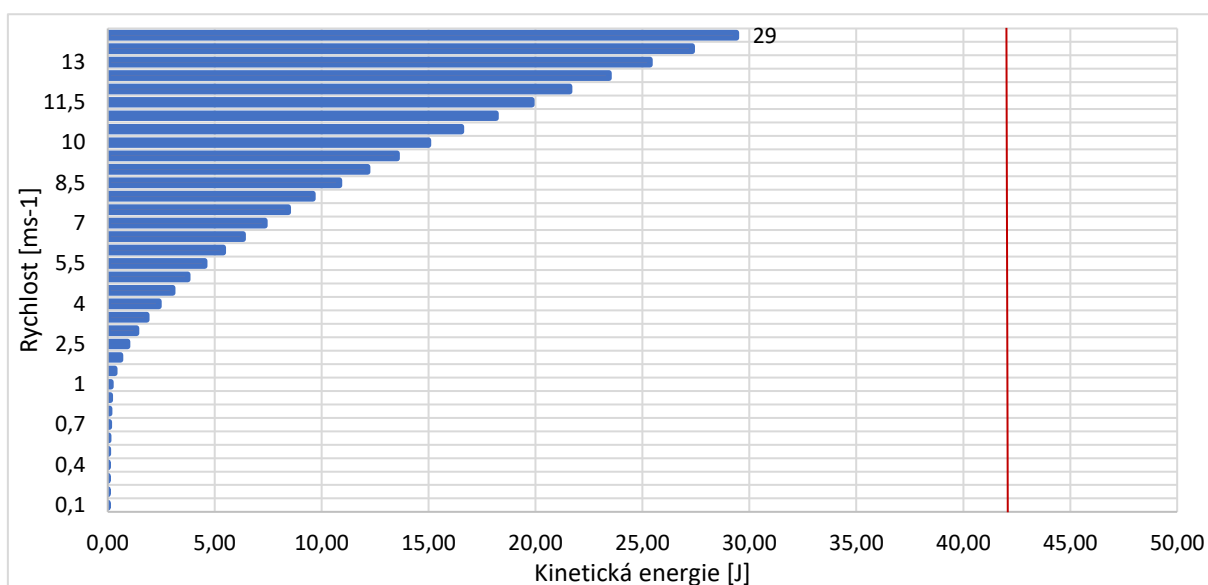
kde m je hmotnost letadla (0,3 kg) a v je jeho rychlost [ms^{-1}]. Maximální rychlost letadla je v tomto případě 50 kmh^{-1} , tedy přibližně $13,9 \text{ ms}^{-1}$. Kinetická energie je pokládána za hlavní proměnou při výpočtu potencionální újmy na zdraví. Pro účely přibližného odhadu užíváme jako jednu z forem vyjádření potencionální způsobené újmy Abbreviated Injury Scale (dále jen „AIS“). Škála reprezentuje určitý kódovací systém, který byl vytvořen Association for the Advancement of Automotive Medicine (dále jen „AAAM“), pro klasifikaci závažnosti zranění podle následků od nepatrných po fatální. Několik studií, navazujících na tuto stupnici také hledalo korelaci mezi kinetickou energií přenesenou na lidské tělo při nárazu a pravděpodobnost fatálního následku – Probability of Failure (dále jen „PoF“). Aktuální odhady dopadu letadla na stojící osobu, zprůměrované na různých oblastech těla, jsou následující:

Tabulka 10 – úrovně AIS (38)

PoF (%)	Kinetická energie (J)	AIS
1	44	2
10	66	3
30	92	4
50	114	5
90	194	6

Z výše uvedeného vyplývá, že při dopředném letu by pro statistickou hodnotu 1 % událostí s fatálním následkem při střetu objektu s osobou, musel objekt letět takovou rychlostí, při jejímž vyvinutí by celková kinetická energie nárazu překročila či byla rovna hranici 44 J. V kontextu praktické realizace experimentu uvažujeme nejhorší možný scénář, tedy rychlost 50 kmh^{-1} , odpovídající přibližně $13,9 \text{ ms}^{-1}$, ve které dosáhne letadlo 29 J. Je tedy zcela pod hranicí AIS 2 (v grafu červeně) a riziko katastrofálního následku v případě takovéto události je značně zanedbatelné.

Graf 7 – velikost kinetické energie při dopředném letu



U kalkulace významu rizika pádu letadla však neuvažujeme pouze situaci, kdy letadlo letí přímým dopředným pohybem směrem k člověku, ale také o situaci, kdy je kontakt způsoben pádem volným. Tato situace může typicky nastat kupříkladu při ztrátě pohonného ústrojí, tím pádem ztrátě vztlaku. Poté musíme zvažovat tíhovou sílu, která je rovna:

$$F_g = mg \quad (6.2)$$

kde m značí hmotnost tělesa a g tíhové zrychlení. (39) Odporová síla, která na těleso v atmosféře působí je pak dle (39) vypočtena z rovnice:

$$F_d = \frac{1}{2} c_D A \rho_A v^2 \quad (6.3)$$

ve které značíme c_D jako koeficient odporu, A jako plochu průřezu tělesa ze strany, na kterou padá, ρ_A jako konstantu hustoty vzduchu v zemské atmosféře ($1,225 \text{ kgm}^{-3}$) a g jako gravitační konstantu ($9,806 \text{ ms}^{-2}$). Volný pád je pohybem rovnoměrně zrychleným. Pokud však uvažujeme o volném pádu v médiu, jakým je atmosféra, musíme ve výpočtu zahrnout také odpor prostředí. Proto vypočteme konečnou rychlost:

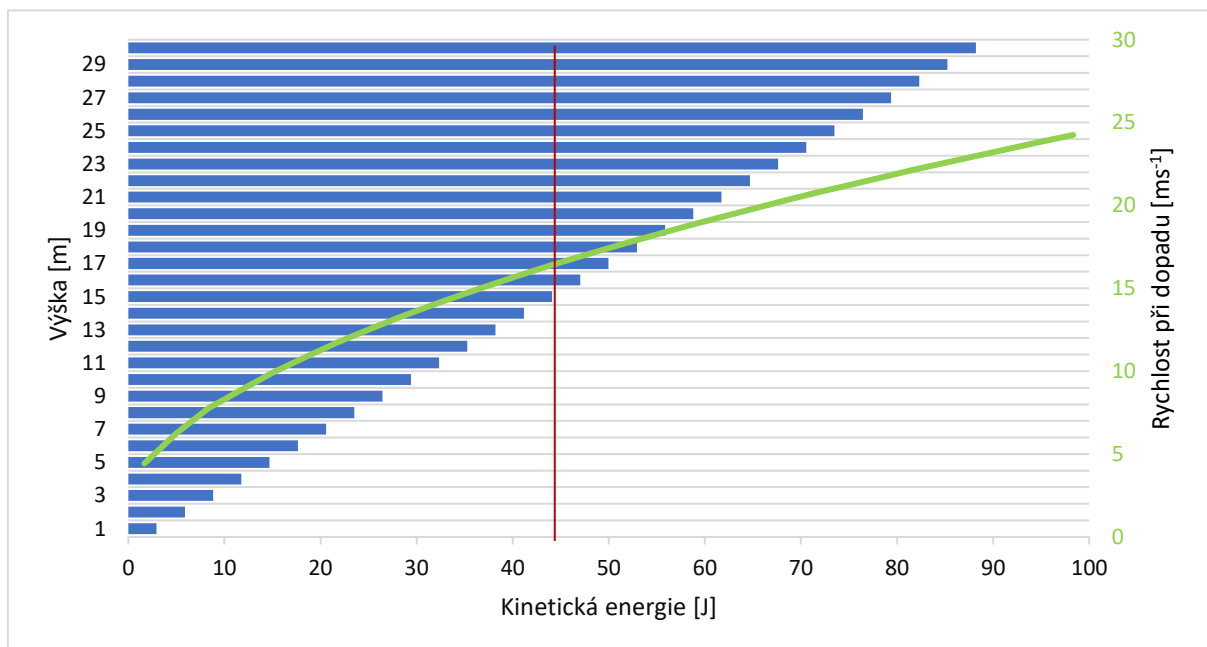
$$v_T = \sqrt{\frac{2mg}{c_D A \rho_A}} \quad (6.4)$$

Rychlost volného pádu tělesa z výšky h , při které předpokládáme, že se těleso nachází v klidovém stavu je definován rovnicí (40):

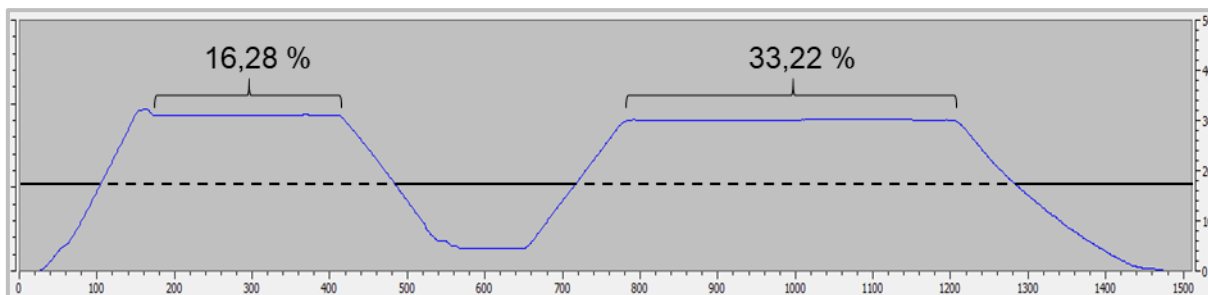
$$v^2 = v_T^2 \left(1 - e^{-\frac{2gh}{v_T^2}} \right) \quad (6.5)$$

Výslednou kinetickou energii tělesa pak určíme dosazením vypočtených proměnných do rovnice (6.1). Ačkoliv lze výše zmíněným postupem dosáhnout přesné kalkulace kinetické energie při dopadu, bylo výpočtu se zahrnutím odporu vzduchu zanedbáno, především v závislosti na povaze experimentu a parametrech letadla. Při maximální výšce 30 m hovoříme o odchylce ve výpočtu s odporovou silou a bez ní v řádu jednotek joulů, a navíc nelze přesně určit jednotnou konstantu koeficientu odporu pro letadlo DJI Spark, jelikož se odvíjí od individuálního příslušenství, instalovaného přímo na letadle. Z tohoto důvodu je pro práci předpokládáno, a bráno jako směrodatné, uvažovat s výpočtem právě pomocí vzorce (6.1).

Graf 8 – velikost kinetické energie při volném pádu



Graf 8 – velikost kinetické energie při volném pádu ukazuje, že potenciální srážka volně padajícího letadla s osobou na zemi bude mít za následek větší rozsah zranění nežli při dopředném letu. Výše definovanou kritickou hranici 44 J dokáže letadlo překonat již po pádu z letové výšky vyšší, než 15 m, resp. 17 m, budeme-li brát v potaz výšku dospělé osoby stojící na zemi. Maximální letová hladina byla na základě vyhodnocení ID značek, tedy zápisů telemetrie, dosahována po 49,5 % letu (viz. obrázek 14 – průběh výšky letu).



Obrázek 14 – průběh výšky letu

Na základě naměřených dat tedy platí, že v celkovém objemu 49,5 % času při letu, je při potenciálním volném pádu způsobena kinetická energie při dopadu odpovídající hodnotě zhruba 88,2 J, tedy 4. kategorii AIS, s PoF 11–30 %. Pro kategorii 1., tedy případné maximální kinetické energii při dopadu o hodnotě 44 J a menší, řadíme průměrně 36,26 % času z letu. Zbýlých 14,24 % letového času tedy probíhá v rámci kategorií 2 a 3.

Tabulka 11 – rizika výskytu osob a majetku

OSOBY A MAJETEK			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
9.	Ohrožení osob	5	1
10.	Ohrožení majetku	3	1

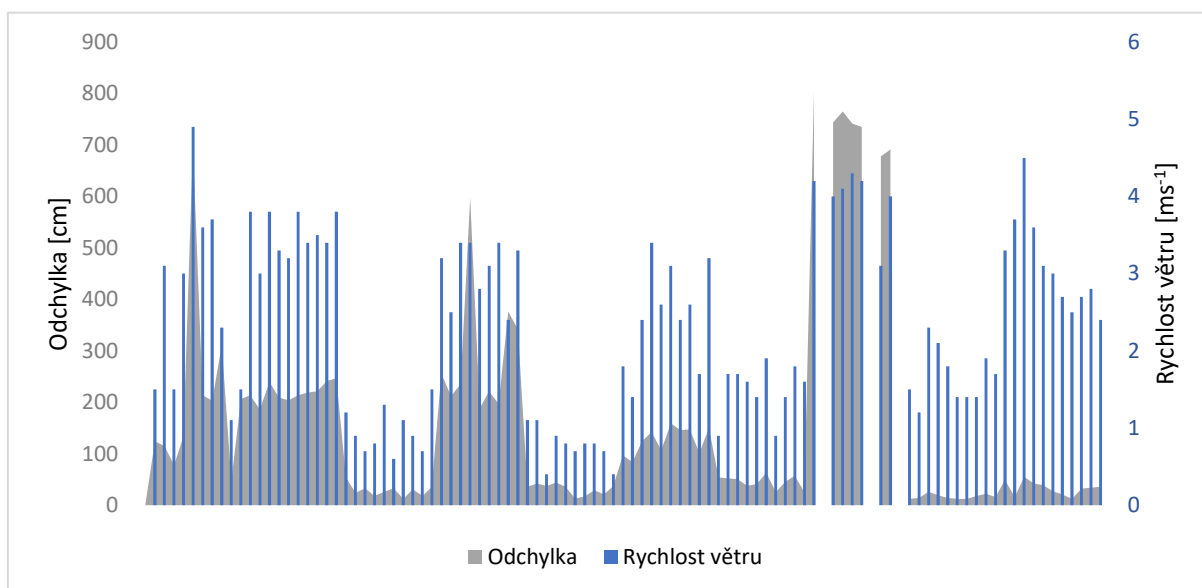
Při testovacích letech nedošlo k významnému ohrožení osob při provozu letadla jak zapojených, tak nezapojených. Lety byly realizovány nad soukromým pozemkem, na němž se nacházelo pole, a tak došlo rovněž k eliminaci rizik v podobě případné kolize se stacionárními objekty. Potenciálním rizikem, zasahujícím nejen do oblasti osob a majetku, ale rovněž do systémů řízení letu bylo elektrické vedení vzdálené zhruba 20 m od místa vzletu. Toto riziko nakonec do průběhu a vyhodnocení experimentu nezasáhlo.

6.2.4 Počasí

Počasí hraje z pohledu bezpečnosti a efektivnosti provozu letadel zcela zásadní roli. Platí to jak pro konvenční pilotovaná letadla, tak pro letadla bez pilota na palubě. Z pohledu bezpilotních letadel můžeme sledovat větší náchylnost zejména na stav srážek a rychlosti větru, v závislosti na hmotnosti, konstrukci a certifikaci, jakou letadlo disponuje. Bepilotní letadlo DJI Spark je poháněno elektromotory, jejichž konstrukce není voděodolná ani vodotěsná (viz. obrázek 15 – usazení elektromotoru 1504S) a při srážkách může dojít k poškození motorů a kritické ztrátě vztlaku či kontroly řízení. Experiment prokázal přímou závislost počasí na změně letových vlastností, zvláště co se přesnosti systému pro

automatický let týče. Křivka odchylky při přistání v grafu 9 – průběh odchylky a rychlosti větru, vynesena sloupcovým zobrazením dat téměř kopíruje tvar plošného grafu demonstrujícího rychlost větru v jednotlivých letových případech. Výjimku při průkaznosti této závislosti opět podtrhává poslední den měření (pravá strana v grafu), ve kterém, po kalibraci kompasu a IMU, dokázalo letadlo přistávat i přes značný vliv větru s velkou mírou přesnosti.

Graf 9 – průběh odchylky a rychlosti větru



Z pohledu rychlosti větru, oblačnosti a její výše bylo statisticky provedeno:

- 29 % letů za zataženého počasí s nízkou oblačností, za existence 3 letů, kdy se letadlo nevrátilo zpět, při průměrné rychlosti větru (při přistání) $2,4 \text{ ms}^{-1}$, přičemž z tohoto objemu letů bylo 66 % letů při srážkách a průměrnou přesností letadla 311,3 cm;
- 28 % letů za počasí jasného, při průměrné rychlosti větru (při přistání) $1,4 \text{ ms}^{-1}$, zcela bez srážek a průměrnou přesností letadla 30,2 cm;
- 22 % letů za počasí skoro jasného, při průměrné rychlosti větru (při přistání) $2,4 \text{ ms}^{-1}$, zcela bez srážek a průměrnou přesností letadla 156,4 cm;
- 21 % letů za zataženého počasí s vysokou oblačností, při průměrné rychlosti větru (při přistání) $3,3 \text{ ms}^{-1}$, zcela bez srážek a průměrnou přesností letadla 121,8 cm.

Celkový obraz počasí tedy disponuje značným vlivem na provoz letadla. Z výše pozorovaných charakteristik tedy můžeme definovat základní rizika s definovaným dopadem na bezpečnost.

Tabulka 12 – rizika počasí

POČASÍ			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
11.	Rychlost větru <0 ms ⁻¹ , 2 ms ⁻¹ >	1	2
12.	Rychlost větru <2 ms ⁻¹ , 5 ms ⁻¹ >	2	4
13.	Srážky	2	2
14.	Teplota <0 °C, 25 °C>	1	5

Ve skupině rizik plynoucích z počasí byla definována rizika spojená s rychlostí větru, úhrnem srážek a také teplotou (intervaly stanoveny na základě zaokrouhleného rozmezí jednotlivých veličin, které byly při experimentu naměřeny). Většina letů probíhala během povětrnostních podmínek, za kterých byla naměřena rychlost větru z intervalu hodnot 2–5 ms⁻¹. Ačkoliv byl výskyt tohoto rizika častý, v rámci celkové bilance vyšlo najevo, že dopad rychlosti větru z tohoto intervalu spočívá spíše ve zhoršení jednotlivých letových vlastností letadla a zvýšených nároku na pilotáž. Celkový dopad v kontextu bezpečnosti je tedy, při výše definované rychlosti větru, malý. S tím spojená rychlost větru pod touto hranicí, tedy riziko číslo 11., byla vyhodnocena jako riziko, jehož výskyt byl sice zaznamenán, ale na celkovou bezpečnost letu působí se zanedbatelným dopadem.



Obrázek 15 – usazení elektromotoru 1504S (zdroj: autor)

Naproti tomu přítomnost jakýchkoliv srážek během testovacích letů byla ještě před realizací samotného experimentu odhadována jako vysoce riziková, zvláště, pokud uvažujeme

konstrukčních vlastností letadla. Ačkoliv nebyl úhrn srážek přesně kvantifikován, byla jejich koexistence s provozem letadla v racionální míře prokázána jako možná, aniž by se za kratší interval (1–10 letů) podepsala na závadě v elektroinstalaci. Po letu 4. letového dne, tedy prvního dne, ve kterém byly lety provedeny při srážkách, byl proveden rozbor elektromotoru (obrázek 15 – usazení elektromotoru 1504S), který viditelné poškození neprokázal. V dalších letech UA také nedošlo ke změně funkčnosti ať už elektromotorů nebo gimbálu kamery, který není zapuštěn v těle letadla.

6.3 Diskuze vyhodnocených rizik

Bilancí všech rizik, které byly identifikovány a ohodnoceny jak v rámci výskytu, tak dopadu, můžeme stanovit jejich celkovou hladinu významnosti. Význam V_m každého rizika byl vypočten pomocí vztahu:

$$V_m = D * V_t \quad (6.6)$$

kde D označuje dopad rizika a V_t číselný popis výskytu tohoto rizika. Činitelé v tomto vztahu mohou nabývat hodnot z intervalu $\langle 1,5 \rangle$. Pak tedy platí, že rozsah významu při výpočtu nabývá hodnot z intervalu $\langle 1,25 \rangle$, s následným rozdělením na základě stupně nebezpečí.

Tabulka 13 – kvantifikace rizik

DOPADY A VÝZNAM RIZIK					
Číslo	Název	Dopad	Výskyt	Význam	Ø Význam
1.	Napětí baterie	4	1	4	6
2.	Uvolnění baterie	5	1	5	
3.	Kritický stav baterie	3	3	9	
4.	Počet satelitů <0,6>	4	1	4	8
5.	Stav senzorů	5	1	5	
6.	Fyzická překážka při letu	3	5	15	
7.	Absence RC vysílače	3	1	3	
8.	Ztráta přenosu telemetrie	3	4	12	
9.	Ohrožení osob	5	1	5	4
10.	Ohrožení majetku	3	1	3	
11.	Rychlost větru <0 ms ⁻¹ ,2 ms ⁻¹ >	1	2	2	5
12.	Rychlost větru <2 ms ⁻¹ ,6 ms ⁻¹ >	2	4	8	
13.	Srážky	2	2	4	
14.	Teplota <0 °C, 25 °C>	1	5	5	

V tabulce 13 – kvantifikace rizik je vypočtena také průměrná hodnota celkového významu v rámci subsystémů letadla, definovaných v kapitole 5.4, doplněných o rizika, jakými jsou například ohrožení osob a majetku zapojených do provozu anebo počasí. Průměrná hodnota hladiny významnosti těchto rizik poukazuje na souhrnnou hodnotu existence nebezpečí napříč těmito skupinami rizik. Pomocí průměrné hladiny významu rizik napříč skupinovým rozdělením rizika dokážeme určit prioritu pro potenciálně přijímaná bezpečnostní opatření. Pokud bychom tedy v rámci hladiny významnosti porovnali skupinu rizik 9–10 se skupinou 11–14, stanovíme vyšší význam pro rizika spojená s počasím, nežli osobami a prostředky, které jsou zapojeny do provozu.

Tabulka 14 – rozložení rizik v matici

		DOPAD				
		Katastrofický	Nebezpečný	Vážný	Malý	Zanedbatelný
VÝSKYT	Častý			6.		14.
	Občasný			8.	12.	
	Velice slabý			3.		
	Nepravděpodobný				13.	11.
	Velice nepravděpodobný	2.,5.,9.	1.,4.	7.,10.		

Z celkového vyhodnocení rizik plyne, že za riziko s nejvyšší hodnotou významu považujeme existenci fyzické překážky za letu. V rámci monitoringu všech rizik je jasné, že pro účely experimentu, jehož předmětem bylo letadlo pilotované prostřednictvím dálkového řízení, nelze toto riziko odstranit, jelikož vychází ze samotné koncepce a metodiky této experimentální činnosti. Pro účely běžného provozu, tedy účelů jiných, než experimentálních (uvažujeme kupříkladu rekreačně-sportovní létání), lze toto riziko bezpečně eliminovat pomocí:

- I. plánování letu – let je předem plánován včetně alternativních trajektorií letu, přičemž letadlo nebude provozováno mimo dosah přímého dohledu pilota, a tedy,
- II. let nebude prováděn na vzdálenost větší než tu, po kterou je letadlo, vzhledem k atmosférickým podmínkám (děšť, sníh, kroupy, aerosoly), viditelné, a zároveň,
- III. letovou trajektorií zamezit výskytu fyzické překážky, která svojí konstrukcí a tvarem znemožňuje pilotovi přímý vizuální kontakt s letadlem a zároveň svým uzpůsobením zvyšuje předpoklad výpadku radiového spojení mezi letadlem a ovládací stanicí na zemi.

S rizikem fyzické překážky letu je rovněž úzce spojeno riziko ztráty přenosu telemetrie. Toto riziko bylo vyhodnoceno jako 2. nejzávažnější, avšak mimo kritickou oblast závažnosti rizik, definovanou v tabulce 14 – rozložení rizik v matici. Ztráta přenosu telemetrických dat je vesměs problematikou přenosu signálu obecně a závisí na mnoha parametrech jak uživatelem ovlivnitelných, tak těch, které nemůže ovlivnit. Kromě eliminace co nejvíce překážek mezi přímou linií pilota, resp. ovladače, a letadla, lze pro snížení dopadu tohoto rizika ztráty přenosu telemetrických dat pracovat se samotným přenosem vln. Komunikační vrstva letadla DJI Spark je založena na Wi-Fi standardu, který pracuje na frekvencích 2,4 a 5,8 GHz. Z pohledu rozsahu provozu letadla se zdá výhodnější užití frekvence 2,4 GHz, disponující větším dosahem spojení, ale v porovnání s 5,8 GHz disponující horšími penetračními vlastnostmi signálu. Ačkoliv lze z technických parametrů vysílacích frekvencí jednoznačně stanovit provozně

výhodnější, nelze ji v podmínkách experimentu zákonně užívat. Dálkový ovladač letadla DJI Spark lze prostřednictvím těchto frekvencí provozovat ve 2 módech – FCC (Federal Communications Commission) a CE (Conformité Européenne). Zatímco FCC popisuje regulační normy pro využívání rádiových frekvencí za komunikačními účely v USA, CE je soubor norem kompatibilních s požadavky směrnic Evropské unie. V rámci evropské normy (na území států EU jediné povolené) dochází k omezení výkonu ovladače, a tedy snížení celkového dosahu a síly výsledného signálu. Český telekomunikační úřad (dále jen „ČTÚ“) ve svém všeobecném oprávnění pro radiová vysílání č. VO-R/10/01.2019-1 stanovuje následující:

Tabulka 15 – podmínky pro nespécifikovaná zařízení krátkého dosahu (41)

Kmitočtové pásmo	Maximální vyzářený výkon
2400–2483,5 MHz	25 mW (13,98 dBm)
5725–5875 MHz	25 mW

Ačkoliv je u Wi-Fi pásem ze strany ČTÚ povolován maximální vyzářený výkon 25 mW, existují v rámci odvětví bezpilotního letectví prostředky využívající technologii střídání kmitočtů, díky níž spadají do výjimky, pro které platí navýšení výkonu na 100 mW. (22) (42) U dálkového ovladače tedy při frekvenci 2,4 GHz pracuje mód FCC: 25 dBm, CE: 18 dBm a při frekvenci 5,8 GHz FCC: 27 dBm, přičemž CE: 14 dBm. (34)



Obrázek 16 – dostupné kanály při CE módu (zdroj: autor)

Výrobce je letadlo konfigurované způsobem, který automaticky na základě zjištěné GPS polohy volí mód kompatibilní s předpisy (viz. obrázek 16 – dostupné kanály při CE módu), vycházející buď z FCC, případně tedy CE. Uživatel tedy oficiální cestou (software s aktuální verzí, bez úmyslného zásahu do GPS apod.) nemůže mezi těmito módy volit a je (ve státech EU) automaticky odkázán na výkony stanovené pro mód CE. I přes legislativní opatření, znemožňující pracovat s jednotlivými módy užití Wi-Fi pásem, lze zlepšit kvalitu spojení letadla a ovladače polohováním antény (vždy kolmo k letadlu). Všesměrovou anténu na ovladači lze rovněž osadit pomocným zesilovačem signálu – tzv. extenderem. Extender slouží k odrážení veškerých vysílaných vln v přímém směru od ovladače, čímž zesiluje signál vysílaný k letadlu. Výrobci těchto zařízení standardně uvádějí prodloužení dosahu spojení o 15-25 %. (43)

6.4 Celková spolehlivost letadla

Letadlo DJI Spark (viz. obrázek 17 – DJI Spark za letu), které bylo předmětem experimentálního zkoumání spolehlivosti v závislosti na vnějším prostředí během experimentu nehavarovalo, a tedy nebylo předmětem nehody ve znění definice leteckého předpisu L 19. Během experimentu došlo celkem ke 3 incidentům, svojí povahou a vnějšími podmínkami relativně podobným, ve smyslu předpisu L 13, tedy událostem jiným než letecká nehoda, spojených s provozem letadla, které ovlivňují nebo by mohly ovlivnit bezpečnost provozu – tedy nesprávnou činnost leteckých a pozemních zařízení v leteckém provozu, jeho řízení a zabezpečování, jejíž důsledky však zpravidla nevyžadují předčasné ukončení letu nebo provádění nestandardních (nouzových) postupů, kdy mezi příčiny těchto incidentů můžeme zahrnout i nepředvídané přírodní jevy (výboje statické elektřiny, střety s ptáky apod.), pokud neohrožily bezpečnost letu do té míry, že byly hodnoceny jako vážný incident nebo letecká nehoda. (44) Letadlo okamžitě reagovalo na pokyny dálkového ovladače ať již výkonem motorů, aktivací a deaktivací systémů, případně ovládním nahrávacího zařízení. Zvukový projev letadla zůstal po celou dobu všech 100 experimentálních letů v každé fázi letu neměnný. Systém od inicializace failsafe systému až po samotnou letovou fázi vždy disponoval stejným časovým intervalem jak pro délku samotného spuštění procesu návratu domů, tak rychlosti stoupání a dopředného letu. Při procesu přistávání se již vyskytly časové rozdíly napříč testovacími lety a v případě, kdy senzory systému nedokázaly vyhodnotit terén, který se nacházel pod letadlem, vyzvaly pilota pro manuální zásah pro zachování bezpečnosti přistávacího manévru. Výsledná míra spolehlivosti empirického experimentu této práce je 97 %. Tedy z celkového objemu letů bylo 97 testů failsafe systému dokončeno bez selhání funkčnosti, poslušnosti úkonů či poruchy.



Obrázek 17 – DJI Spark za letu (zdroj: autor)

7 Interaktivní nástroj kvantifikace rizik

V této kapitole bude popsán nástroj pro kvantifikaci rizik. Vzhledem k přístupnosti UAS, a tedy provozu s nimi spojenému, může v řadě situací docházet k nedostatečnému vyhodnocení potenciálních rizik. Vědomí o jejich existenci a celkové hodnotě, která by případnou kvantifikací jasně stanovila míru nebezpečí zamýšlené provozní situace, by přitom díky úpravě provozních opatření mohla vést k celkovému zlepšení řízení bezpečnosti letu a tím přispět k ochraně osob a majetku. Základem správného řízení bezpečnosti, pro předmětný provoz UAS nevyjímaje, není pouze definice a ohodnocení rizik z provozu identifikovaných, ale také opatření, která se správnou časovou rezervou dokáží snížit rizika vzniku nepříznivé situace.

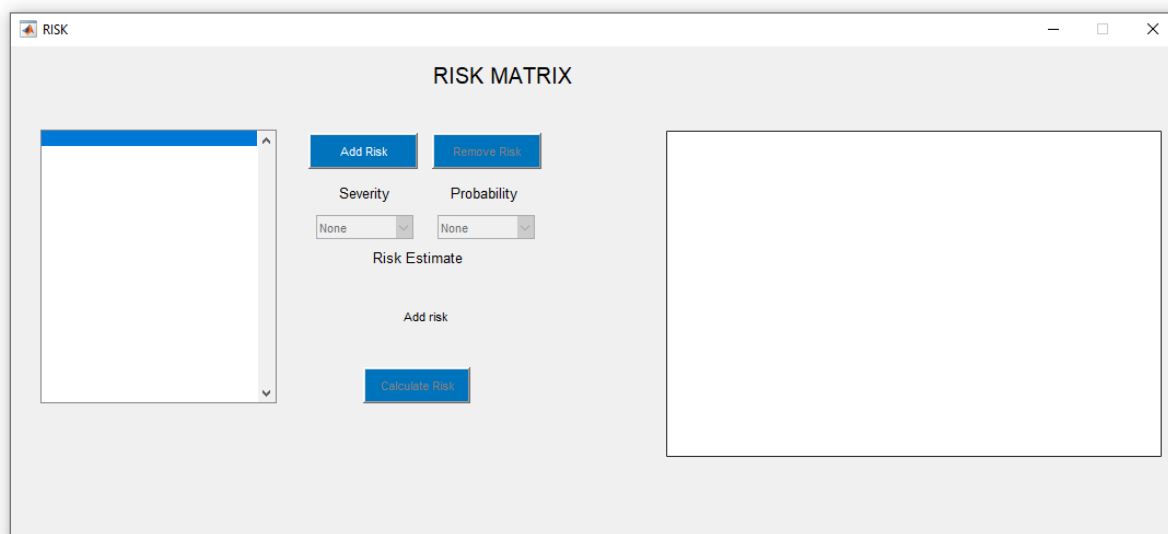
Legislativní opora řízení bezpečnosti v oblasti UAS, kromě dnes již závazně platných právních předpisů, bude klást nároky plynoucí především z klasifikace letadel a také na provozovatele, v závislosti na rozsahu a parametřích zamýšleného provozu. V návaznosti na kapitolu týkající se Harmonizovaná legislativa UAS bude provoz, zařazený do kategorií „Specific“ nebo „Certified“ podléhat nárokům na řízení bezpečnosti, ať již pomocí užití STS, které analýzu rizik nahradí, případně dle náležitostí SORA – tedy vícestupňového posuzování rizik. Z pohledu uživatele UAS zamýšlejícího provoz na rekreačně-sportovní bázi a jeho kategorizaci v „Open“ kategorii není vymahatelný požadavek na řízení rizik podobný tomu, jaký je závazný pro kategorie zbylé. Plyne to především z povahy provozu, do které tento druh provozu spadá, tedy provoz za předpokladu nízké míry rizika, bez povolení a nutné certifikace ze strany ÚCL. I zde je však nutno dodržovat základní prvky zachování bezpečnosti letu. Pokud navíc provozovatel v kategorii „Open“ jakýmkoliv parametrem provozu nesplní podmínky pro svoji kategorizaci, automaticky spadá pod kategorii „Specific“, ve které je již řízení bezpečnosti vyžadováno. Interaktivní nástroj pro kvantifikaci rizik identifikovaných v provozu by tedy za předpokladu zachování přehledného a zároveň jednoduchého rozhraní, závislého na přesných vstupech uživatele, generickou povahou a uživatelsky dostupným rozhraním dokázal pokrýt část bezpečnostního řízení v oblasti rizik napříč všemi kategoriemi provozu.

Vzhledem ke koncepci této práce bylo rovněž vycházeno z dokumentu ICAO Doc 9859 (SMM). Celkový vzhled a funkce programu, byly vytvářeny na základě poznatků a postupů uplatněných v kapitolách výše, tak, aby celkový byl proces řízení rizik v konečném výsledku pro potenciálního uživatele snadno pochopitelný, uživatelsky přívětivý, aby celkovou evaluaci urychlil a zautomatizoval, na základě všech vstupů podal jednotný a čitelný výstup, jehož

číselná hodnota bude interpretována také pomocí textu a grafického zobrazení na interaktivní matici, která tvoří pravou část rozhraní.

7.1 Popis programu

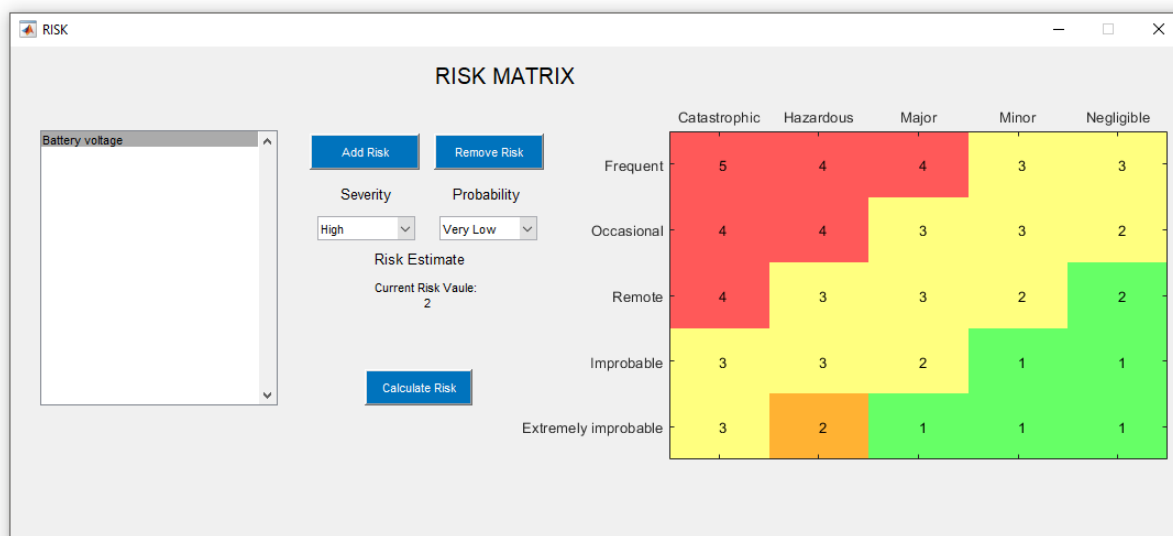
Při otevření programu je uživateli nabídnuta pouze jedna možnost výběru konfigurace. Pomocí jediného dostupného tlačítka „Add Risk“ je uživatel vyzván ke vložení rizika, které bude předmětem výpočtu. Jak plyne z obrázku 18 – MATLAB – prvotní okno, je při hledisku techniky tvorby programu rovněž důležité zachovat ergonomii a logickou posloupnost zobrazení dalších dat. Proto je prvotní fáze, tedy spuštění celého rozhraní a následného vložení prvního vstupu, co nejvíce graficky a uživatelsky zjednodušená. Po zmáčknutí tlačítka „Add Risk“ je uživateli nabídnuto vyskakovací okno s textovým polem, do kterého uživatel napíše pojmenování svého prvního rizika, se kterým hodlá v rámci řízení rizik pracovat. Po potvrzení svého záměru se riziko vloží do levého rolovacího okna, ve kterém pak postupně dochází k vytvoření seznamu jednotlivých rizik, ve kterém lze kdykoliv během užívání procházet jednotlivá rizika a dále je dle potřeby upravit či odstranit.



Obrázek 18 – MATLAB – prvotní okno

Po zadání prvního vstupního parametru dojde k aktualizaci několika oken v programu (viz. obrázek 19 – MATLAB – okno vkládání rizik). Dojde k udělení přístupu pro tlačítka „Remove Risk“ pro případ, že má uživatel potřebu odstranit riziko, které v předchozím kroku do programu vložil. Zároveň se zpřístupní rolovací okénka pro ohodnocování jak vážnosti předmětného rizika, taktéž jeho pravděpodobnosti výskytu. Uživatel má v rámci práce každého z těchto oken možnost volit z 5 ohodnocení, která jsou slovně popsána. V případě, že uživatel

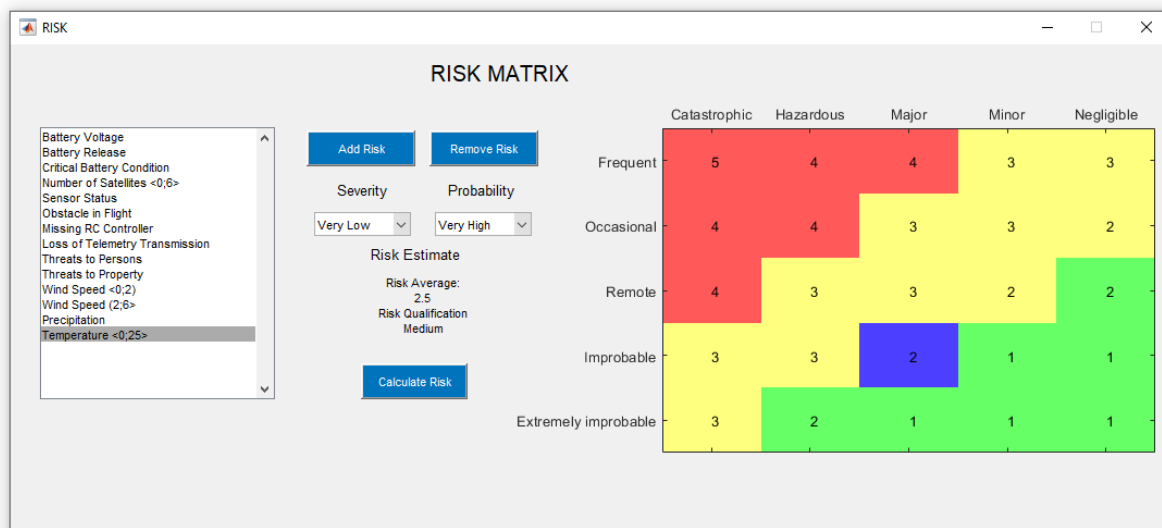
do této fáze neodstraní jím vložené riziko a zároveň pomocí skupiny rolovacích oken vloží ohodnocení rizika, dojde v grafické matici, která je umístěná v pravé části rozhraní, k barevnému vyznačení polohy významnosti rizika napříč spektrem, které svým číselným a barevným rozlišením zobrazuje polohu a velikost významu rizika. Toto zobrazení polohy rizika oranžovou barvou je pouze průběžné, pro každé z rizik individuální, a svým oranžovým zbarvením je uživateli předkládána poloha pro každé z rizik zvlášť. Pokud se tedy program nachází ve stavu, ve kterém je do něj uloženo a zároveň ohodnoceno více rizik, může uživatel snadno, v rámci zpětného výběru mezi riziky v seznamu na levé straně grafického rozhraní, průběžně kontrolovat polohy jednotlivých hodnocení, které jsou použity pro výsledný výpočet. Dále je v tomto kroku zobrazeno okno informačního charakteru, generující aktuální hodnotu rizika, které uživatel ohodnotil (tedy korespondující s grafickým zobrazením v pravé části), a je rovněž v rámci označování jednotlivých rizik v seznamu průběžně obnovováno na základě toho, jaké riziko se uživatel výběrem z tohoto seznamu rozhodl zobrazit. Pokud uživatel ukončuje tuto fázi při práci s programem, měl by v rámci svého řízení bezpečnosti vložit názvy a hodnocení všech rizik, se kterými hodlá pracovat. Při překročení ke kroku výsledného výpočtu uživatel stiskne tlačítko „Calculate Risk“.



Obrázek 19 – MATLAB – okno vkládání rizik

Po vložení všech rizik a jejich ohodnocení proběhne požadovaná kalkulace výsledné úrovně bezpečnosti, plynoucí ze vstupů a záměru uživatele. Výsledné riziko je číselně vyhodnoceno na stupnici 1–5, kterou doprovází slovní hodnocení celkové situace, pro účely této práce vymezeno jednoslovným označením. Jak je patrné z obrázku číslo 20 – MATLAB – evaluace, dojde k vyznačení také výsledné polohy v grafickém zhodnocení matice – tentokrát je hodnota zvýrazněna modrým podkresem pole s odpovídající číselnou hodnotou. Vzhledem k tomu, že

pro celkový výpočet je v programu užit mechanismus průběžného ukládání souřadnic u jednotlivých vkládaných ohodnocení rizik, je na tomto základě následně možné provést výpočet aritmetického průměru pro konečný výsledek „Risk Average“.



Obrázek 20 – MATLAB – evaluace

Celkový výpočet je tedy programem uskutečněn pomocí vypočtení aritmetických průměru z indexů $(p_{x,y})$, označujících pozice, kterým jsou průběžně vkládaná ohodnocení rizik přiřazována. Každá pozice má pak svoji přiřazenou hodnotu pro dosažení do výpočtu aritmetických průměrů, ze které je vypočten celkový výsledek. V závislosti na počtu vstupů uživatele může v numerickém výsledku docházet k výskytu desetinných čísel, která pro celkové zhodnocení uživatele může znamenat chybné odvození interpretovaného výsledku kalkulace pro zamýšlenou operaci. Z tohoto důvodu je výsledek interpretován nejen číselnou, ale také grafickou a slovní formou, díky níž může uživatel získat nezkrácený výsledek a zároveň je do značné míry eliminována případná chybná interpretace tohoto výsledku.

8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo pomocí realizace praktického experimentu na letadle, které svými parametry zastupuje majoritní skupinu registrovaného letadlového parku napříč provozní situací UAS ve vzdušném prostoru České republiky, zhodnotit funkčnost failsafe systému, jehož parametry a provozní aspekty korespondují s výše zmíněnou majoritní skupinou letadel. Na základě praktické experimentální činnosti pak z hodnocení určit následnou celkovou spolehlivost failsafe systému. Dále bylo cílem této práce provést ohodnocení bezpečnosti spojené s provozem tohoto systému, jejíž vlastnosti a identifikace rizik vychází přímo z charakteristik získaných během praktického experimentu. Posledním dílčím cílem pak bylo vytvořit interaktivní nástroj pro práci s riziky, tedy kvantifikaci a jejich celkové vyhodnocování, především pro užití amatérskými uživateli, ale také uživateli provozující prostředky na profesionální bázi, díky čemuž lze v budoucnu docílit zlepšení bezpečnosti provozního prostředí a také bezpečnosti letů, které budou realizovány ve vzdušném prostoru České republiky.

Praktický experiment se v zamýšleném záměru co do rozsahu a vlastností podařilo realizovat. Během letové činnosti nedošlo k letecké nehodě, ke zranění osob či poškození majetku. Naměřená data společně s rozšířením v poznání pilotáže prokázala, že ačkoliv jsou bezpilotní systémy v leteckém odvětví relativně inovativní a v současnosti již rozšířenou skupinou, dokáží disponovat dobrými provozními vlastnostmi. Z celkového objemu provedených letů plnil failsafe systém svoji funkci za stanovených podmínek a určených vlastností okolního prostředí s mírou spolehlivosti 97 %. Základní parametry, které měly podíl na degradaci spolehlivosti byla především fyzická překážka během letu, která rušila přímý kontakt pilota s letadlem, a také počasí, které svou povahou rovněž snižovalo celkovou míru spolehlivosti. Oba tyto degradační prvky mají společný podtext – snížení kvality přenosu signálu mezi řídicí stanicí a pilotem – tedy celkový vliv na funkčnost tohoto systému.

Data naměřená během praktické fáze experimentu sloužila k identifikaci a ohodnocení rizik, jejichž výsledná kvantifikace vedla k vytvoření uceleného obrazu na stav bezpečnosti při předemném provozu. Na základě této kvantifikace bylo možné identifikovat největší rizika a skupiny rizik, plynoucích z provozu letadla za podmínek experimentu a pomocí jejich analýzy předložit opatření, kterými lze docílit eliminace těchto rizik. Při tomto procesu řízení bezpečnosti a naplnění posledního z dílčích cílů práce byl v přímé návaznosti vytvořen nástroj v programovém rozhraní MATLAB, který na podobných principech tak, jak bylo představeno v práci, dokáže případnému uživateli výrazně pomoci při celkovém vyhodnocování

bezpečnosti letu, případě jiných parametrů, které v rámci řízení bezpečnosti analyzuje. Prostředí vytvořené aplikace splnilo požadavky na uživatelskou přívětivost a svým potenciálem tak dokáže být v budoucnu užíván širokým spektrem provozovatelů UAS.

V rámci analýzy podobných prací a odborných textů nejen v České republice, ale také ve světě, bylo zjištěno, že se dosud problematikou zálohovacích bezpečnostních systému v bezpilotních letadel na podobné bázi zabývalo pouze nepatrné množství autorů. Z důvodu tohoto a také důvodů plynoucích z masivního nárůstu v užívání bezpilotních systémů napříč celou společností autor považuje tuto práci za možný impuls k zaměření pozornosti na tyto implementované systémy nejen v oblasti bezpilotního letectví, ale také dalších odvětví, včetně výzkumu s tím spojeným. Tato práce, která svým rozsahem a hloubkou analýzy, odvíjející se od technických a legislativních možností, testovala spolehlivost failsafe systému bezpilotního letadla, dokázala splnit vytyčené cíle.

Zdroje

1. PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy*. Praha : Gallileo Training, 2015. 978-80-260-8309-2.
2. Dohoda č. 147/1947 Sb., Úmluva o mezinárodním civilním letectví. *Zákony pro lidi.cz*. [Online] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1947-147>.
3. Zákon č. 49/1997 Sb., Zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. *Zákony pro lidi.cz*. [Online] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49?text=leteck%C3%BD+z%C3%A1kon>.
4. Povinně zveřejňované informace. CAA. [Online] 2. Únor 2011. [Citace: 16. Leden 2018.] <http://www.caa.cz/urad/povinne-zverejnovane-informace>.
5. LIS. Doplněk X – Bezpilotní systémy. *Letecká informační služba - Řízení letového provozu ČR, sp.* [Online] 16. Listopadu 2019. [Citace: 8. Únor 2019.] <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>.
6. BARTSCH, Ronald I. C. *International aviation law: a practical guide*. New York : Routledge, 2018. 978-1-138-55921-9.
7. Drone Definition. *English Oxford Dictionaries*. [Online] Oxford University. [Citace: 4. Leden 2019.] <https://en.oxforddictionaries.com/definition/drone>.
8. ICAO. *Cir 328 - Unmanned Aircraft. Systems (UAS)*. Montréal : ICAO, 2011. 978-92-9231-751-5.
9. ICAO. *Doc 10019 - Manual on RPAS*. Montréal : ICAO, 2015. 978-92-9249-718-7.
10. Drone Enable Programme. ICAO. [Online] 1. Srpen 2018. [Citace: 24. Únor 2019.] [https://www.icao.int/Meetings/DRONEENABLE2/Documents/Draft%20DRONE%20ENABLE%20%20Programme%20\(1.08.18\).pdf](https://www.icao.int/Meetings/DRONEENABLE2/Documents/Draft%20DRONE%20ENABLE%20%20Programme%20(1.08.18).pdf).
11. RAUF, Don. *Getting the most out of makerspaces to build unmanned aerial vehicles*. New York : The Rosen Publishing Group, 2015. 978-1-4777-7827-2.
12. KULČÁK, Ludvík. *Air traffic management*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. 80-7204-229-7.
13. STOLZER, Alan J., HALFORD, Carl D., GOGLIA, John J. *Safety management systems in aviation*. Burlington : Ashgate Publishing Company, 2012. 978-0-7546-7304-0.

14. ICAO. www.icao.int. *Doc 9859*. [Online] 2013. [Citace: 18. Březen 2019.] <https://www.icao.int/safety/safetymanagement/documents/doc.9859.3rd%20edition.alltext.en.pdf>.
15. MALASKY, Sol W. *System safety: planning/engineering/management*. New York : Spartan Books, 1974. 978-0876715598.
16. LIS. Předpis L 19 Hlava 1. *Letecká informační služba - Řízení letového provozu ČR, sp.* [Online] 2013. [Citace: 18. Březen 2019.] <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-19/index.htm>.
17. GRATT, L. B. *The Definition of Risk and Associated Terminology for Risk Analysis*. Bonin : Springer, 1989. 978-1-4684-5684-4.
18. ARTIKIS, Constantinos a ARTIKIS, Panagiotis. *Probability distributions in risk management operations*. New York : Springer Berlin Heidelberg, 2015. 978-3-319-14255-5.
19. TODINOV, M. T. *Reliability and risk models setting reliability requirements*. Chichester : Southern Gate, 2016. 978-1118873328.
20. MISHRA, R. C. *Reliability and Quality Management*. Nové Dílí : New Age International, 2009. 978-8122426885.
21. ČSN ISO 9000:2000. *Systémy managementu jakosti - Základy*. Praha : Český normalizační institut Praha, 2000.
22. KARAS, Jakub a TICHÝ, Tomáš. *Drony*. Brno : Computer Press, 2016. 978-80-251-4680-4.
23. Evidence. CAA. [Online] [Citace: 14. Únor 2019.] <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/evidence>.
24. ÚZPLN. Závěrečná zpráva. *ÚZPLN*. [Online] Květen 2017. [Citace: 9. Únor 2019.] <http://www.uzpln.cz/pdf/20170510084114.pdf>.
25. Civil drones. EASA. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.] <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas/drones-regulatory-framework-background>.
26. Příprava společných evropských pravidel. CAA. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.] <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube/priprava-spolecnych-evropskych-pravidel>.
27. CE - mark. *EUROPA*. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.] https://europa.eu/youreurope/business/product/ce-mark/index_cs.htm.

28. Opinion No 01/2018. *EASA*. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.]
<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2001-2018.pdf>.
29. UAS operations in the 'open' and 'specific' categories. *EASA*. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.] <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/DRAFT%20ANNEX%20%28Part-UAS%29%20to%20DRAFT%20COMMISSION%20REGULATION%20%28EU%29%20...-%20laying%20down%20rules%20and%20procedures%20for%20the%20operation%20of%20unmanned%20aircraft.pdf>.
30. U-space. *SESAR*. [Online] [Citace: 22. Únor 2019.]
<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20Blueprint%20brochure%20final.PDF>.
31. Definition of "fail-safe". *Collins Dictionary*. [Online] [Citace: 14. Duben 2019.]
<https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/fail-safe>.
32. Advisory Circular. *FAA*. [Online] [Citace: 2. Leden 2018.]
https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_23-13A.pdf.
33. Spark User Manual. *DJI*. [Online] Říjen 2017. [Citace: 8. Březen 2019.]
<https://dl.djicdn.com/downloads/Spark/20171031/Spark%20User%20Manual%20V1.6.pdf>.
34. Spark Tech Specs. *DJI*. [Online] Říjen 2017. [Citace: 26. Únor 2019.]
<https://www.dji.com/cz/spark/specs>.
35. HARRIS, Don (Ed.). *Engineering psychology and cognitive ergonomics: cognition and design*. New York : Springer Berlin Heidelberg, 2017. 978-3-319-58474-4.
36. How to prolong lithium based batteries. *Battery University*. [Online] 21. Říjen 2010. [Citace: 8. Březen 2019.]
https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries.
37. L-6iii. *L/S*. [Online] [Citace: 18. Březen 2019.]
https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-6/L-6iii/data/print/L-6-III_cely.pdf.
38. Explanatory Note for the UAS. *EASA*. [Online] 22. Srpen 2016. [Citace: 18. Březen 2019.]
<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Explanatory%20Note%20for%20the%20UAS%20Prototype%20regulation%20final.pdf>.
39. CROWE, C. T. *Engineering fluid mechanics*. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2009. 978-0470-25977-1.

40. FOWLES, Grant R. a George L. CASSIDAY. *Analytical mechanics*. Belmont : Thomson Brooks/Cole, 2005. 0-534-49492-7.
41. Všeobecné oprávnění VO-R/10/01.2019-1. ČTÚ. [Online] [Citace: 11. Duben 2019.] <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/01.2019-1/obrazky/vo-r10-012019-1.pdf>.
42. Opatření obecné povahy . PV-P/14/12.2008-18. ČTÚ. [Online] [Citace: 11. Duben 2019.] https://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok_2008/pv-p_14-12_2008-18.pdf.
43. Range extender zlepšení dosahu a signálu pro DJI Spark, Mavic Pro, Air. *Mobilní režisér*. [Online] [Citace: 11. Duben 2019.] https://www.mobilnireziser.cz/natacim-dronem/range-extender-zlepseni-dosahu-a-signalu-pro-dji-mavic-a-dji-spark/?gclid=CjwKCAjwq-TmBRBdEiwAaO1en9eBIBgkmlcdDJXZ5TWsEevaxm48_6uH_IKHWnY6quWYRMDKpsQRBoCkEkQAvD_BwE.
44. LIS. Předpis L 13 Hlava 1. *Letecká informační služba - Řízení letového provozu ČR, sp*. [Online] 2013. [Citace: 10. Květen 2019.] <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-13/data/print/L13-cely.pdf>.
45. ELSAYED, A. Reliability engineering. *Wiley series in systems engineering and management*. Hoboken : John Wiley, 2012. 978-1-118-13719-2.

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 – charakteristický průběh intenzity poruch (45).....	19
Obrázek 2 – grafický průběh činnosti CPU a failsafe (24)	22
Obrázek 3 – schéma DJI RTH	29
Obrázek 4 – vyhýbání se překážkám při RTH (zdroj: autor).....	31
Obrázek 5 – schéma testovacího letu (zdroj: autor)	34
Obrázek 6 – polární graf letu (zdroj: autor)	35
Obrázek 7 – schéma prioritních subsystémů	37
Obrázek 8 – schéma incidentu.....	38
Obrázek 9 – průběh letových režimů	39
Obrázek 10 – proces kalibrace (33)	42
Obrázek 11 – životnost Li-Po baterií (36).....	44
Obrázek 12 – zjednodušené blokové schéma zapojení elektroinstalace (27)	45
Obrázek 13 – ukázka ztráty přenosu na OSD	49
Obrázek 14 – průběh výšky letu.....	53
Obrázek 15 – usazení elektromotoru 1504S (zdroj: autor).....	55
Obrázek 16 – dostupné kanály při CE módu (zdroj: autor).....	59
Obrázek 17 – DJI Spark za letu (zdroj: autor).....	61
Obrázek 18 – MATLAB – prvotní okno	63
Obrázek 19 – MATLAB – okno vkládání rizik	64
Obrázek 20 – MATLAB – evaluace.....	65
Tabulka 1 – definice vybraných vzdušných prostorů (12).....	17
Tabulka 2 – pravděpodobnost bezpečnostních rizik (14)	18
Tabulka 3 – dopady bezpečnostních rizik (14)	19
Tabulka 4 – pravidla pro open kategorii (28)	25
Tabulka 5 – specifikace letadla (34).....	32
Tabulka 6 – seznam měřených veličin	36
Tabulka 7 – procentuální přesnost přistání.....	39
Tabulka 8 – rizika napájecího systému	46
Tabulka 9 – rizika systému řízení letu.....	48
Tabulka 10 – úroveň AIS (38)	50
Tabulka 11 – rizika výskytu osob a majetku	53
Tabulka 12 – rizika počasí.....	55
Tabulka 13 – kvantifikace rizik	57
Tabulka 14 – rozložení rizik v matici	58
Tabulka 15 – podmínky pro nespécifikovaná zařízení krátkého dosahu (41)	59

Přílohy

Příloha 1: záznamový list externích měření

Číslo	Počasí	Srážky	Teplota [°C]	Vítr T/O [ms ⁻¹]	Vítr [L] [ms ⁻¹]	Kalibrace	Ø SAT	Odchylna [cm]	Datum
1	SJ	NE	24.1	3.1	1.5	NE	16	124	6.9.2018
2	SJ	NE	24.1	3	3.1	NE	18	115	6.9.2018
3	SJ	NE	24.1	2.1	1.5	NE	19	78	6.9.2018
4	SJ	NE	24.1	2.3	3	NE	19	133	6.9.2018
5	SJ	NE	24.1	3.2	4.9	NE	19	698	6.9.2018
6	SJ	NE	24.1	1.7	3.6	NE	20	214	6.9.2018
7	SJ	NE	24.1	1.9	3.7	NE	19	203	6.9.2018
8	SJ	NE	24.1	3.4	2.3	NE	17	311	6.9.2018
9	SJ	NE	24.1	1.9	1.1	NE	17	48	6.9.2018
10	SJ	NE	24.1	3	1.5	NE	17	206	6.9.2018
11	Z, VO	NE	20.5	3.9	3.8	NE	16	214	7.10.2018
12	Z, VO	NE	20.5	3.8	3	NE	18	186	7.10.2018
13	Z, VO	NE	20.5	3.4	3.8	NE	15	239	7.10.2018
14	Z, VO	NE	20.5	3.2	3.3	NE	15	209	7.10.2018
15	Z, VO	NE	20.5	2.9	3.2	NE	15	204	7.10.2018
16	Z, VO	NE	20.5	3.9	3.8	NE	17	214	7.10.2018
17	Z, VO	NE	20.5	3.3	3.4	NE	16	219	7.10.2018
18	Z, VO	NE	20.5	3.4	3.5	NE	16	221	7.10.2018
19	Z, VO	NE	20.5	3.7	3.4	NE	15	241	7.10.2018
20	Z, VO	NE	20.6	3.4	3.8	NE	14	247	7.10.2018
21	J	NE	13,3	1.1	1.2	NE	19	53	16.11.2018
22	J	NE	13,3	0.7	0.9	NE	19	24	16.11.2018
23	J	NE	13,3	0.9	0.7	NE	18	33	16.11.2018
24	J	NE	13,3	0.9	0.8	NE	19	18	16.11.2018
25	J	NE	13,3	1.2	1.3	NE	19	26	16.11.2018
26	J	NE	13,3	0.5	0.6	NE	19	33	16.11.2018
27	J	NE	13,3	0.4	1.1	NE	19	12	16.11.2018
28	J	NE	13,3	0.5	0.9	NE	18	31	16.11.2018
29	SJ	NE	13,2	1.1	0.7	NE	19	18	16.11.2018
30	SJ	NE	13,2	1.6	1.5	NE	18	35	16.11.2018
31	Z, NO	ANO	7.4	3.2	3.2	NE	15	256	22.12.2018
32	Z, NO	ANO	7.4	3.4	2.5	NE	15	212	22.12.2018
33	Z, NO	ANO	7.4	3	3.4	NE	14	235	22.12.2018
34	Z, NO	ANO	7.4	4.1	3.4	NE	12	597	22.12.2018
35	Z, NO	ANO	7.4	2.9	2.8	NE	16	188	22.12.2018
36	Z, NO	ANO	7.5	3.9	3.1	NE	15	221	22.12.2018
37	Z, NO	ANO	7.5	3.1	3.4	NE	13	197	22.12.2018
38	Z, NO	ANO	7.5	2.6	2.4	NE	14	376	22.12.2018
39	Z, NO	ANO	7.5	2.7	3.3	NE	15	342	22.12.2018
40	Z, NO	NE	4.8	0.6	1.1	NE	19	36	12.1.2019
41	Z, NO	NE	4.8	1.2	1.1	NE	19	42	12.1.2019
42	Z, NO	NE	4.8	1.5	0.4	NE	18	37	12.1.2019
43	Z, NO	NE	4.8	1.8	0.9	NE	17	44	12.1.2019
44	Z, NO	NE	4.8	1	0.8	NE	19	36	12.1.2019
45	Z, NO	NE	4.8	0.4	0.7	NE	17	13	12.1.2019
46	Z, NO	NE	4.8	0.5	0.8	NE	19	17	12.1.2019

47	Z, NO	NE	4.8	0.6	0.8	NE	19	29	12.1.2019
48	Z, NO	NE	4.8	0.3	0.7	NE	19	21	12.1.2019
49	Z, NO	NE	4.8	0.7	0.4	NE	19	37	12.1.2019
50	SJ	NE	3.1	2.1	1.8	NE	16	97	19.1.2019
51	SJ	NE	2.7	1.8	1.4	NE	16	84	19.1.2019
52	SJ	NE	2.7	2.2	2.4	NE	16	124	19.1.2019
53	SJ	NE	2.7	3.1	3.4	NE	16	142	19.1.2019
54	SJ	NE	2.7	2.1	2.6	NE	16	107	19.1.2019
55	SJ	NE	2.7	2.6	3.1	NE	16	159	19.1.2019
56	SJ	NE	2.8	2.1	2.4	NE	17	146	19.1.2019
57	SJ	NE	2.8	2.4	2.6	NE	17	147	19.1.2019
58	SJ	NE	2.8	1.8	1.7	NE	16	102	19.1.2019
59	SJ	NE	2.8	2.5	3.2	NE	18	150	19.1.2019
60	J	NE	0.1	1.8	0.9	NE	18	54	26.1.2019
61	J	NE	1.2	1.7	1.7	NE	19	52	26.1.2019
62	J	NE	1.7	2	1.7	NE	19	51	26.1.2019
63	J	NE	1.3	1.4	1.6	NE	19	38	26.1.2019
64	J	NE	1.7	1.6	1.4	NE	19	41	26.1.2019
65	J	NE	1.8	2.1	1.9	NE	19	63	26.1.2019
66	J	NE	1.6	0.7	0.9	NE	18	25	26.1.2019
67	J	NE	1.4	1.6	1.4	NE	19	46	26.1.2019
68	J	NE	1.7	1.8	1.8	NE	19	57	26.1.2019
69	J	NE	1.6	1.5	1.6	NE	19	26	26.1.2019
70	Z, NO	ANO	0.2	4.1	4.2	NE	7	804	23.2.2019
71	Z, NO	ANO	0.2	4		NE	8		23.2.2019
72	Z, NO	ANO	0.2	3.9	4	NE	9	744	23.2.2019
73	Z, NO	ANO	0.2	3.7	4.1	NE	10	765	23.2.2019
74	Z, NO	ANO	0.2	3.9	4.3	NE	7	741	23.2.2019
75	Z, NO	ANO	0.2	4.1	4.2	NE	8	735	23.2.2019
76	Z, NO	ANO	0.2	4.2		NE	7		23.2.2019
77	Z, NO	ANO	0.2	3.7	3.1	NE	7	678	23.2.2019
78	Z, NO	ANO	0.2	4	4	NE	9	691	23.2.2019
79	Z, NO	ANO	0.2	3.3		NE	7		23.2.2019
80	J	NE	11.7	1.4	1.5	NE	16	12	21.3.2019
81	J	NE	11.7	1.5	1.2	NE	16	14	21.3.2019
82	J	NE	11.7	2.1	2.3	NE	18	26	21.3.2019
83	J	NE	11.7	1.4	2.1	NE	18	19	21.3.2019
84	J	NE	11.7	1.7	1.8	NE	18	14	21.3.2019
85	J	NE	11.7	1.3	1.4	NE	18	12	21.3.2019
86	J	NE	11.7	1.2	1.4	NE	19	12	21.3.2019
87	J	NE	11.7	1.5	1.4	NE	19	18	21.3.2019
88	J	NE	11.7	1.5	1.9	NE	18	22	21.3.2019
89	J	NE	11.7	1.5	1.7	NE	19	16	21.3.2019
90	Z, VO	NE	14.2	3.2	3.3	ANO	19	49	21.3.2019
91	Z, VO	NE	14.2	3.5	3.7	ANO	19	16	6.4.2019
92	Z, VO	NE	14.2	3.4	4.5	ANO	19	55	6.4.2019
93	Z, VO	NE	14.2	3.1	3.6	ANO	19	42	6.4.2019
94	Z, VO	NE	14.2	3.6	3.1	ANO	19	39	6.4.2019
95	Z, VO	NE	14.2	2.9	3	ANO	19	27	6.4.2019
96	Z, VO	NE	14.2	2.2	2.7	ANO	19	21	6.4.2019
97	Z, VO	NE	14.2	2.4	2.5	ANO	18	12	6.4.2019
98	Z, VO	NE	14.1	2.5	2.7	ANO	19	32	6.4.2019
99	Z, VO	NE	14.1	2.6	2.8	ANO	19	34	6.4.2019
100	Z, VO	NE	14.1	2.7	2.4	ANO	19	36	6.4.2019

Příloha 2: ukázka části konvertovaného výstupu z telemetrie letadla

ID	Secs	Time	LAT	LON	FlightMod	ALT	VPS	Speed	HD	GPS #	Batt %	Batt VDC	V-x	V-y	V-z	Pitch*	Roll*	HDG*	RC Pitch	RC Roll	RC Yaw	RC UpDn	Error / Inf Message	Warning L	Warning H
1	433.5	07 m 13.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0		0.0	0.0		16		0.0	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
2	433.6	07 m 13.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0		0.0	0.0		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	HP changed		
3	433.7	07 m 13.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0		0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
4	433.8	07 m 13.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0		0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.9 ←	083.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
5	433.9	07 m 13.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0		0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
6	434.0	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
7	434.1	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.8 ←	083.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
8	434.2	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.9 ←	083.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
9	434.3	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	2.0 ←	083.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
10	434.4	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	2.0 ←	083.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
11	434.5	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.9 ←	083.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
12	434.6	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.4 ↓	2.1 ←	083.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
13	434.7	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.2 ↓	1.9 ←	083.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.			
14	434.8	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.9 ←	083.8	-	-	-	4 % ▲			
15	434.9	07 m 14.50.232257	13.417323	EngineSta	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.2 ↓	1.9 ←	083.8	-	-	-	21 % ▲			
16	435.0	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	1.9 ←	083.8	@	@	@	70 % ▲			
17	435.1	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.2 ↓	1.9 ←	083.8	@	@	@	92 % ▲			
18	435.2	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.3 ↓	2.0 ←	083.9	@	@	@	100 % ▲			
19	435.3	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.4 ↓	2.2 ←	083.9	@	@	@	100 % ▲			
20	435.4	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.4 ↓	2.5 ←	083.9	@	@	@	100 % ▲			
21	435.5	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.6 ↓	3.1 ←	084.0	@	@	@	100 % ▲			
22	435.6	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.0	0.9		16	48	11.1V	0.0	0.0	-0.0	1.4 ↓	3.5 ←	084.1	@	@	@	100 % ▲			
23	435.7	07 m 15.50.232257	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.1	0.9		16	48	11.1V	0.1	0.0	-0.0	1.2 ↓	4.1 ←	083.9	@	@	@	100 % ▲			
24	435.8	07 m 15.50.232258	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.2	1.0		16	48	11.1V	0.2	0.0	-0.0	0.7 ↓	5.3 ←	083.1	@	@	@	100 % ▲			
25	435.9	07 m 15.50.232258	13.417323	AutoTake	0.0	0.0	0.3	1.0		16	48	11.1V	0.3	0.0	0.2	0.9 ↓	4.1 ←	082.9	@	@	@	100 % ▲			
26	436.0	07 m 16.50.232258	13.417323	AutoTake	0.1	0.1	0.4	1.0		16	48	11.1V	0.4	0.1	0.5	1.0 ↓	0.7 →	082.6	@	@	@	100 % ▲			
27	436.1	07 m 16.50.232259	13.417324	AutoTake	0.1	0.1	0.5		1.1	16	48	11.1V	0.5	0.2	0.6	0.2 ↑	4.6 →	082.7	@	@	@	100 % ▲			
28	436.2	07 m 16.50.232259	13.417324	AutoTake	0.2	0.2	0.4		1.1	16	48	11.1V	0.4	0.2	0.8	2.5 ↑	5.5 →	082.8	@	@	@	100 % ▲			
29	436.3	07 m 16.50.232260	13.417324	AutoTake	0.3	0.3	0.5		1.1	16	48	11.1V	0.4	0.3	0.9	3.4 ↑	7.0 →	083.1	@	@	@	100 % ▲			
30	436.4	07 m 16.50.232260	13.417325	AutoTake	0.4	0.4	0.5		1.1	18	48	11.1V	0.4	0.3		1.1 4.7 ↑	5.8 →	083.0	@	@	@	100 % ▲			
31	436.5	07 m 16.50.232261	13.417326	AutoTake	0.5	0.5	0.4		1.1	18	48	11.1V	0.3	0.3		1.1 5.9 ↑	4.7 →	082.9	@	@	@	100 % ▲			
32	436.6	07 m 16.50.232261	13.417327	AutoTake	0.7	0.7	0.4		1.1	17	48	11.1V	0.3	0.3		1.1 6.2 ↑	4.9 →	083.1	@	@	@	100 % ▲			
33	436.7	07 m 16.50.232261	13.417327	AutoTake	0.9	0.8	0.4	0.5		17	48	11.1V	0.3	0.3		1.1 6.3 ↑	4.4 →	083.0	@	@	@	73 % ▲			
34	436.8	07 m 16.50.232262	13.417328	AutoTake	1.0	1.0	0.3	0.5		19	48	11.1V	0.2	0.2		1.1 5.5 ↑	5.4 →	083.1	@	@	@	47 % ▲			
35	436.9	07 m 16.50.232262	13.417328	Sport		1.1	1.1	0.3	0.6		19	48	11.1V	0.2	0.2		1.1 5.4 ↑	4.9 →	083.3	-	-	-	-		
36	437.0	07 m 17.50.232262	13.417328	Sport		1.1	1.1	0.2	0.6		18	48	11.1V	0.2	0.1		1.1 4.6 ↑	3.6 →	083.2	-	-	-	-		
37	437.1	07 m 17.50.232262	13.417328	Sport		1.1	1.1	0.2	0.6		18	48	11.1V	0.2	0.1		2.0 4.4 ↑	4.1 →	083.3	-	-	-	-		
38	437.2	07 m 17.50.232263	13.417328	Sport		1.1	1.1	0.2	0.7		18	48	11.1V	0.2	0.1		2.0 5.0 ↑	5.7 →	083.4	-	-	-	-		
39	437.3	07 m 17.50.232263	13.417329	Sport		2.0	2.0	0.3	0.7		18	48	11.1V	0.2	0.2		1.1 5.8 ↑	6.2 →	083.4	-	-	-	-		
40	437.4	07 m 17.50.232263	13.417329	Sport		2.1	2.1	0.3	0.7		18	48	11.1V	0.2	0.2		1.1 6.3 ↑	6.4 →	083.5	-	-	-	-		
41	437.5	07 m 17.50.232263	13.417329	Sport		2.1	2.1	0.3	0.8		18	48	11.1V	0.2	0.2		1.1 6.2 ↑	5.2 →	083.5	-	-	-	-		
42	437.6	07 m 17.50.232263	13.417330	Sport		2.1	2.1	0.2	0.8		19	48	11.1V	0.1	0.2		0.8 5.9 ↑	3.9 →	083.4	-	-	-	-		
43	437.7	07 m 17.50.232264	13.417330	Sport		2.1	2.1	0.2	0.8		19	48	11.1V	0.1	0.2		0.6 5.4 ↑	4.2 →	083.2	-	-	-	-		
44	437.8	07 m 17.50.232264	13.417330	Sport		2.1	2.1	0.3	0.8		19	48	11.1V	0.1	0.3		0.3 5.3 ↑	3.7 →	083.1	-	-	-	-		
45	437.9	07 m 17.50.232264	13.417331	Sport		2.1	2.1	0.3	0.9		19	48	11.1V	0.1	0.3		0.1 5.6 ↑	2.9 →	083.0	-	-	-	-		
46	438.0	07 m 18.50.232264	13.417331	Sport		2.1	2.1	0.3	0.9		19	48	11.1V	0.1	0.3		-0.0 5.9 ↑	2.0 →	083.0	-	-	-	-		
47	438.1	07 m 18.50.232264	13.417332	Sport		2.1	2.1	0.3	0.9		19	48	11.1V	0.1	0.3		-0.0 5.9 ↑	2.0 →	083.0	-	-	-	-		
48	438.2	07 m 18.50.232264	13.417332	Sport		2.1	2.1	0.3	0.9		19	48	11.1V	0.0	0.3		-0.0 5.5 ↑	1.9 →	083.0	-	-	-	-		
49	438.3	07 m 18.50.232264	13.417333	Sport		2.1	2.1	0.3	1.0		19	48	11.1V	0.1	0.3		0.1 6.4 ↑	2.1 →	082.9	-	-	-	-		
50	438.4	07 m 18.50.232264	13.417333	Sport		2.1	2.1	0.3	1.0		18	48	11.1V	0.1	0.3		0.1 7.4 ↑	2.5 →	083.1	-	-	-	-		

Příloha 3: tabulka identifikovaných rizik

NAPÁJECÍ SYSTÉM			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
1.	Napětí baterie	4	1
2.	Uvolnění baterie	5	1
3.	Kritický stav baterie	3	3
SYSTÉM ŘÍZENÍ LETU			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
4.	Počet satelitů <0,6>	4	1
5.	Stav senzorů	5	1
6.	Fyzická překážka při letu	3	5
7.	Absence RC vysílače	3	1
8.	Ztráta přenosu telemetrie	3	4
OSOBY A MAJETEK			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
9.	Ohrožení osob	5	1
10.	Ohrožení majetku	3	1
POČASÍ			
Číslo	Název	Dopad	Výskyt
11.	Rychlost větru <0 ms ⁻¹ , 2 ms ⁻¹ >	1	2
12.	Rychlost větru <2 ms ⁻¹ , 5 ms ⁻¹ >	2	4
13.	Srážky	2	2
14.	Teplota <0 °C, 25 °C>	1	5

Příloha 4: kód MATLAB rozhraní

```
function varargout = RISK(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @RISK_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @RISK_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = RISK_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes just before RISK is made visible.
function RISK_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

GenerateMatrix;      % Vykresleni matice

% Nastaveni Pop-up Menu Severity a Probability
set(handles.PUMseverity(:), 'String', {'None'; 'Very Low'; 'Low';...
    'Normal'; 'High'; 'Brutal'});
set(handles.PUMprob(:), 'String', {'None'; 'Very Low'; 'Low'; 'Med';...
    'High'; 'Very High'});
set(handles.PUMseverity, 'Enable', 'off');
set(handles.PUMprob, 'Enable', 'off');

% Nastaveni PushButton Remove Risk a Calculate Risk
set(handles.PBremoveRisk, 'Enable', 'off');
set(handles.PBcalRisk, 'Enable', 'off');

% Nastaveni vchoziho textu na MainDisplay
set(handles.MainDisplay, 'String', {''; ''}; 'Add risk');

% vytvoreni noveho prazdneho dokumentu pro seznam rizik
delete('List.xlsx')
xlswrite('List.xlsx', NaN)

% Promenna k vypoctu celkove hodnoty rizika
setappdata(0, 'vecCal', 0);
```

```

% Matice uchovava hodnoty S a P pro jednotlivá rizika, aby se dali S a P
% nastavit při procházení ListRisku
setappdata(0, 'matSevProb', zeros(1,2));

% Promenne pro zobrazení Checklistu
setappdata(0, 'Name', {'Risk'});
setappdata(0, 'Levels', {'Severity'; 'None'});
setappdata(0, 'LevelP', {'Probability'; 'None'});

matColor = [1 1 1 2 2;
            1 1 2 2 2;
            1 2 2 2 3;
            2 2 2 3 3;
            2 3 3 3 3];
setappdata(0, 'matColor',matColor);

matText = [5 4 4 3 3;
           4 4 3 3 2;
           4 3 3 2 2;
           3 3 2 1 1;
           3 2 1 1 1];
setappdata(0, 'matText',matText);

function GenerateMatrix(hObject, eventdata, handles)
matColor = getappdata(0, 'matColor');
matText = getappdata(0, 'matText');

cmap = [1 .35 .35; 1 1 .5; .4 1 .4];

imagesc(matColor)
colormap(cmap)
[X,Y]=meshgrid(1:size(matText,1),1:size(matText,2));
str = sprintf('%d',matText(:));
text(X(:),Y(:),str);

% Define row and column labels
ColLabels={'Catastrophic', 'Hazardous', 'Major', 'Minor', 'Negligible'};
RowLabels={'Frequent', 'Occasional', 'Remote', 'Improbable', ...
          'Extremely improbable'};

% Some axes settings
set(gca, 'xtick', unique(X), ...
      'ytick', unique(Y), ...
      'yticklabels', RowLabels, ...
      'xticklabels', ColLabels);
set(gca, 'xaxisLocation', 'top');

function TotalRiskMatrix(matIndexes)
matText = getappdata(0, 'matText');
matColor = getappdata(0, 'matColor');
matColor( matIndexes(2), matIndexes(1)) = 5;

```



```

cmapTR = [1 .35 .35; 1 1 .5; .4 1 .4; .3 .25 1];

imagesc(matColor)
colormap(cmapTR)
[X,Y]=meshgrid(1:size(matText,1),1:size(matText,2));
str = sprintfc('%d',matText(:));
text(X(:,Y(:),str);

% Define row and column labels
ColLabels={'Catastrophic', 'Hazardous', 'Major', 'Minor', 'Negligible'};
RowLabels={'Frequent', 'Occasional', 'Remote', 'Improbable', ...
    'Extremely improbable'};

% Some axes settings
set(gca, 'xtick', unique(X), ...
    'ytick', unique(Y), ...
    'yticklabels', RowLabels, ...
    'xticklabels', ColLabels);
set(gca, 'xaxisLocation', 'top');

function HighlightMatrix(IndexRisk)
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');
matText = getappdata(0, 'matText');
matColor = getappdata(0, 'matColor');
c = 7 - matSevProb(IndexRisk, 1);
r = 7 - matSevProb(IndexRisk, 2);
matColor(r, c) = 5;

cmapHL = [1 .35 .35; 1 1 .5; .4 1 .4; 1 .7 .2];

imagesc(matColor)
colormap(cmapHL)
[X,Y]=meshgrid(1:size(matText,1),1:size(matText,2));
str = sprintfc('%d',matText(:));
text(X(:,Y(:),str);

% Define row and column labels
ColLabels={'Catastrophic', 'Hazardous', 'Major', 'Minor', 'Negligible'};
RowLabels={'Frequent', 'Occasional', 'Remote', 'Improbable', ...
    'Extremely improbable'};

% Some axes settings
set(gca, 'xtick', unique(X), ...
    'ytick', unique(Y), ...
    'yticklabels', RowLabels, ...
    'xticklabels', ColLabels);
set(gca, 'xaxisLocation', 'top');

% --- Executes on button press in PBaddRisk.
function PBaddRisk_Callback(hObject, eventdata, handles)
Name = getappdata(0, 'Name');
Levels = getappdata(0, 'Levels' );
LevelP = getappdata(0, 'LevelP' );

```

```

matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');
vecCal = getappdata(0, 'vecCal' );
answer = inputdlg('Risk','Insert identified Risk');

% Vychozi nastaveni tabulky
GenerateMatrix

if isempty(cell2mat(answer))
else
List=get(handles.ListRisk,'UserData');
if isempty(List)
% Nastaveni a prepsani seznamu v dokumentu
List=cellstr(answer);
set(handles.ListRisk,'String',List);
set(handles.ListRisk,'UserData',List);
xlswrite('List.xlsx',List)
% Nastaveni ostatnich casti GUI
set(handles.PBaddRisk,'Enable','off');
% Nelze pridat dalsi risk dokud nezadas S a P
set(handles.PBremoveRisk,'Enable','on');
set(handles.PUMseverity,'Enable','on');
set(handles.PUMseverity,'Value',1);
set(handles.PUMprob,'Enable','on');
set(handles.PUMprob,'Value',1);
set(handles.MainDisplay, 'String', ...
'Choose level of Severity and Probability' );
% Zapis nazvu zadaneho Risku pro Checklist
Name(2,1)=answer;
setappdata(0, 'Name', Name);
else
% Nastaveni a prepsani seznamu v dokumentu
List(size(List,1)+1,1)=cellstr(answer);
set(handles.ListRisk,'String',List);
set(handles.ListRisk,'UserData',List);
xlswrite('List.xlsx',List);
% Nastaveni ukazatele ListRisk na posledni pridany Risk
set(handles.ListRisk, 'Value', length(get(handles.ListRisk,...
'String')));
% Nastaveni ostatnich casti GUI
set(handles.PBaddRisk,'Enable','off');
% Nelze pridat dalsi risk dokud nezadas S a P
set(handles.PBremoveRisk,'Enable','on');
set(handles.PBcalRisk,'Enable','off');
set(handles.PUMseverity,'Value',1);
set(handles.PUMprob,'Value',1);
set(handles.MainDisplay, 'String', ...
'Choose level of Severity and Probability' );
% Zapis nazvu zadaneho Risku pro Checklist
Name(size(Name,1)+1,1) = answer; setappdata(0, 'Name', Name);
LevelS(size(Name,1)) = {'None'}; setappdata(0, 'LevelS', LevelS);
LevelP(size(Name,1)) = {'None'}; setappdata(0, 'LevelP', LevelP);
% Zapis noveho rizika do matSevProb
matSevProb(size(matSevProb,1)+1,:) = 0;
setappdata(0, 'matSevProb', matSevProb);

```

```

        % Zapis noveho rizika do vecCal
        vecCal(length(List), 1 ) = 0;
        setappdata(0, 'vecCal', vecCal);
    end
end

% --- Executes on button press in PBremoveRisk.
function PBremoveRisk_Callback(hObject, eventdata, handles)
List = get(handles.ListRisk, 'UserData');
vecCal = getappdata(0, 'vecCal' );
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');

Name = getappdata(0, 'Name' );
LevelS = getappdata(0, 'LevelS' );
LevelP = getappdata(0, 'LevelP' );

% Vychozi nastaveni tabulky
GenerateMatrix

if size(List,1) == 1
    % Smazani a vytvoreni noveho prazdneho seznamu (dokumentu)
    delete('List.xlsx')
    xlswrite('List.xlsx', NaN);
    % Nastaveni hodnot ListRisk seznamu
    set(handles.ListRisk, 'String', []);
    set(handles.ListRisk, 'UserData', []);
    set(handles.ListRisk, 'Value', 1);
    % Nastaveni PushButtons
    set(handles.PBaddRisk, 'Enable', 'on');
    set(handles.PBremoveRisk, 'Enable', 'off');
    set(handles.PBcalRisk, 'Enable', 'off');
    % Nastaveni Pop-up Menu Severity a Prob.
    set(handles.PUMseverity, 'Value', 1);
    set(handles.PUMseverity, 'Enable', 'off');
    set(handles.PUMprob, 'Value', 1);
    set(handles.PUMprob, 'Enable', 'off');
    % Nastaveni MainDisplay
    set(handles.MainDisplay, 'String', []);
    % Zapis vychozich hodnot pro Checklist
    setappdata(0, 'vecCal', 0);
    Name = {'Risk'; ''}; setappdata(0, 'Name', Name);
    LevelS = {'Severity'; 'None'}; setappdata(0, 'LevelS', LevelS);
    LevelP = {'Probability'; 'None'}; setappdata(0, 'LevelP', LevelP);
    % Sestaveni a zobrazeni Checklistu
    Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=LevelS; Checklist(:,3)=LevelP;
    disp('Checklist')
    disp(Checklist)
    % Nastaveni hodnot matSevProb pro prazdny seznam
    setappdata(0, 'matSevProb', zeros(1,2));
else
    % Ziskani hodnoty ukazatele v ListRisku pro upravu seznamu a Checklistu
    index_selected = get(handles.ListRisk, 'Value');
    % Uprava (vymazani rizika) a ulozeni seznamu
    List(index_selected)=[];

```

```

xlswrite('List.xlsx',List)
% Nastaveni objektu ListRisk
set(handles.ListRisk, 'String', List);
set(handles.ListRisk, 'UserData', List);
set(handles.ListRisk, 'Value', 1);
% Uprava dat pro vypočet celkoveho rizika
vecCal ( index_selected ) = []; setappdata(0, 'vecCal', vecCal);
% Uprava (vymazani rizika) a ulozeni matice matSevProb
matSevProb(index_selected,:) = [];
setappdata(0, 'matSevProb', matSevProb);
% Nastaveni PushButton AddRisk
set(handles.PBaddRisk, 'Enable', 'on');
% Nastaveni Pop-up Menu S a P po vymazani rizika
set(handles.PUMseverity, 'Value', matSevProb(1, 1));
set(handles.PUMprob, 'Value', matSevProb(1, 2));
% Nastaveni MainDisplay
set(handles.MainDisplay, 'String', []);
% Uprava dat pro Checklist
Name ( index_selected + 1 ) = []; setappdata(0, 'Name', Name);
Levels ( index_selected + 1 ) = []; setappdata( 0, 'Levels', Levels );
LevelP ( index_selected + 1 ) = []; setappdata( 0, 'LevelP', LevelP );
% Zobrazeni Checklistu
Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=Levels; Checklist(:,3)=LevelP;
disp('Checklist')
disp(Checklist)
end

% --- Executes on selection change in PUMseverity.
function PUMseverity_Callback(hObject, eventdata, handles)
SevString = get(handles.PUMseverity, 'String');
ProbString = get(handles.PUMprob, 'String');
ValueSev = get(handles.PUMseverity, 'Value');
ValueProb = get(handles.PUMprob, 'Value');
SelectedRisk = get(handles.ListRisk, 'Value');

matText=getappdata(0, 'matText');
vecCal = getappdata(0, 'vecCal' );
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');

Name = getappdata(0, 'Name' );
Levels = getappdata(0, 'Levels' );
LevelP = getappdata(0, 'LevelP' );

% Vychozi nastaveni tabulky
GenerateMatrix

if (ValueSev == 1 || ValueProb == 1) && vecCal(SelectedRisk,1) == 0
    set(handles.MainDisplay, 'String', ...
        'Choose level of Severity and Probability' );
elseif (ValueSev == 1 || ValueProb == 1) && vecCal(SelectedRisk, 1) ~= 0
    set(handles.PUMseverity, 'Value', matSevProb(SelectedRisk, 1));
    HighlightMatrix ( SelectedRisk )
else
    % Zobrazeni current value Risk na MainDisplay

```

```

set(handles.MainDisplay, 'String', {''; 'Current Risk Vaule: '; ...
    num2str(matText (7 - ValueSev, 7 - ValueProb))});
% Zapis a zobrazeni Checklistu
LevelS( SelectedRisk + 1, 1 ) = SevString( ValueSev );
LevelP( SelectedRisk + 1, 1 ) = ProbString( ValueProb );
setappdata( 0, 'LevelS', LevelS );
setappdata( 0, 'LevelP', LevelP );
Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=LevelS; Checklist(:,3) = LevelP;
disp('Checklist')
disp(Checklist)
% Aktualizace vecCal - pro celkovou hodnotu rizika
vecCal(SelectedRisk, 1 ) = matText (7 - ValueSev, 7 - ValueProb);
setappdata(0, 'vecCal', vecCal);
% Nastaveni ostatnich casti GUI
set(handles.PBcalRisk,'Enable','on');
set(handles.PBaddRisk,'Enable','on');
% Zapis hodnod S a P do matice matSevProb
matSevProb(SelectedRisk, 1) = ValueSev;
matSevProb(SelectedRisk, 2) = ValueProb;
setappdata(0, 'matSevProb', matSevProb);

% Zvyrazneni vybraného rizika
HighlightMatrix ( SelectedRisk )
end

% --- Executes on selection change in PUMprob.
function PUMprob_Callback(hObject, eventdata, handles)
SevString = get(handles.PUMseverity, 'String');
ProbString = get(handles.PUMprob, 'String');
ValueSev = get(handles.PUMseverity, 'Value');
ValueProb = get(handles.PUMprob, 'Value');
SelectedRisk = get(handles.ListRisk, 'Value');

matText = getappdata(0, 'matText');
vecCal = getappdata(0, 'vecCal' );
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');

Name = getappdata(0, 'Name' );
LevelS = getappdata(0, 'LevelS' );
LevelP = getappdata(0, 'LevelP' );

% Vychozi nastaveni tabulky
GenerateMatrix

if (ValueProb == 1 || ValueSev == 1) && vecCal(SelectedRisk,1) == 0
    set(handles.MainDisplay,'String',...
        'Choose level of Severity and Probability');
elseif (ValueSev == 1 || ValueProb == 1) && vecCal(SelectedRisk,1) ~= 0
    set(handles.PUMprob,'Value',matSevProb(SelectedRisk,2));
    HighlightMatrix ( SelectedRisk )
else
    % Zobrazeni current value Risk na MainDisplay
    set(handles.MainDisplay, 'String', {'Current Risk Vaule: '; ...
        num2str(matText (7 - ValueSev, 7 - ValueProb))});

```

```

% Zapis a zobrazeni Checklistu
LevelS(SelectedRisk + 1, 1) = SevString(ValueSev);
LevelP(SelectedRisk + 1, 1) = ProbString( ValueProb);
setappdata(0, 'LevelS', LevelS);
setappdata(0, 'LevelP', LevelP);
Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=LevelS; Checklist(:,3)=LevelP;
disp('Checklist')
disp(Checklist)
% Aktualizace vecCal - pro celkovou hodnotu rizika
vecCal(SelectedRisk, 1 ) = matText (7 - ValueSev, 7 - ValueProb);
setappdata(0, 'vecCal', vecCal);
% Nastaveni ostatnich casti GUI
set(handles.PBcalRisk,'Enable','on');
set(handles.PBaddRisk,'Enable','on');
% Zapis hodnod S a P do matice matSevProb
matSevProb(SelectedRisk, 1) = ValueSev;
matSevProb(SelectedRisk, 2) = ValueProb;
setappdata(0, 'matSevProb', matSevProb);

% Zvyrazneni vybraného rizika
HighlightMatrix ( SelectedRisk )
end

% --- Executes on button press in PBcalRisk.
function PBcalRisk_Callback(hObject, eventdata, handles)
vecCal = getappdata(0, 'vecCal');
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');

% Vychozi nastaveni tabulky
GenerateMatrix

totalRisk = sum(vecCal)/length(vecCal);

if totalRisk >= 1 && totalRisk < 2
    set(handles.MainDisplay,'String', {'Risk Average:'; totalRisk; ...
        'Risk Qualification'; 'Low'});
elseif totalRisk >= 2 && totalRisk < 3
    set(handles.MainDisplay,'String', {'Risk Average:'; totalRisk; ...
        'Risk Qualification'; 'Medium'});
elseif totalRisk >= 3 && totalRisk < 4
    set(handles.MainDisplay,'String', {'Risk Average:'; totalRisk; ...
        'Risk Qualification'; 'High'});
elseif totalRisk >= 4 && totalRisk <= 5
    set(handles.MainDisplay,'String', {'Risk Average:'; totalRisk; ...
        'Risk Qualification'; 'Very High'});
end

% Vypocet indexu pozice vysledneho rizika
matIndexes(1, 1) = 7 - round(sum(matSevProb(:,1))/size(matSevProb,1));
matIndexes(1, 2) = 7 - round(sum(matSevProb(:,2))/size(matSevProb,1));

% Zvyrazneni celkového rizika
TotalRiskMatrix(matIndexes)

```

```

% --- Executes on selection change in ListRisk.
function ListRisk_Callback(hObject, eventdata, handles)
SelectedRisk = get(handles.ListRisk, 'Value');
vecCal = getappdata(0, 'vecCal' );
matSevProb = getappdata(0, 'matSevProb');
List=get(handles.ListRisk,'UserData');

Name = getappdata(0, 'Name' );
Levels = getappdata(0, 'Levels' );
LevelP = getappdata(0, 'LevelP' );

if isempty(List)
elseif min( matSevProb( SelectedRisk, :)) == 0
    % Vychozi nastaveni tabulky
    GenerateMatrix
    set(handles.PUMseverity, 'Value', 1);
    set(handles.PUMprob, 'Value', 1);
    set(handles.MainDisplay, 'String', ...
        'Choose level of Severity and Probability');
    Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=Levels; Checklist(:,3) = LevelP;
    disp('Checklist')
    disp(Checklist)
else
    set(handles.MainDisplay, 'String', {'Current Risk Value'; ...
        vecCal(SelectedRisk)});
    set(handles.PUMseverity, 'Value', matSevProb(SelectedRisk, 1));
    set(handles.PUMprob, 'Value', matSevProb(SelectedRisk, 2));
    % Vychozi nastaveni tabulky
    GenerateMatrix
    % Zvyrazneni vybraného rizika
    HighlightMatrix ( SelectedRisk )

    Checklist(:,1)=Name; Checklist(:,2)=Levels; Checklist(:,3) = LevelP;
    disp('Checklist')
    disp(Checklist)
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function PUMseverity_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to PUMseverity (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function PUMprob_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to PUMprob (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), ...
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ListRisk_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ListRisk (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), ...
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```