

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Michal Černý

**NÁVRH OCHRANY LETIŠTĚ VÁCLAVA HAVLA
PRAHA PROTI UAS**

Bakalářská práce

2020



K621**Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Michal Černý

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LED – Letecká doprava

Název tématu (česky): **Návrh ochrany letiště Václava Havla Praha proti UAS**

Název tématu (anglicky): Proposal of Defense Strategy of Vaclav Havel Airport Prague Against UAS

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout zabezpečení letiště Václava Havla Praha proti bezpilotním prostředkům pomocí výběru vhodného systémového řešení integrujícího dostupné a budoucí technologie s integrací těchto technologií do celkového systému ochrany letiště.
- Historický a geografický vývoj letiště Václava Havla
- Vývoj C-UAS (counter UAS) systémů a dostupné technologie C-UAS
- Návrh zabezpečení letiště proti bezpilotním prostředkům
- Zhodnocení návrhu a doporučení k implementaci



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Counter-Unmanned Aircraft System (CUAS) Capability for Battalion-and-Below Operations: Version of Restricted Report
Commision Delegated Regulation (EU) 2019/945 and 2019/947
EASA: U-space draft regulation

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**
Ing. Šárka Hulínská

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajících ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **10. srpna 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

.....

Michal Černý
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....9. října 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu psaní bakalářské práce. Dále chci poděkovat Ing. Sabině Lajdové za poskytnutí konzultace a přístupu k potřebným informacím. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat celé mé rodině a blízkým za podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 9. srpna 2020


.....
podpis

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navržení ochrany letiště Václava Havla proti UAS. První část práce řeší význam největšího českého letiště a z něho plynoucí potřebu jeho ochrany. Následující část se zabývá samotným konceptem CUAS. V práci je definován jeho historický vývoj a následně jsou rozděleny jednotlivé systémy dle technologií, které využívají. Z vhodných systémů byl následně sestaven samotný návrh zabezpečení. V závěru práce bylo provedeno vyhodnocení návrhu z hlediska jeho dosahu, škálovatelnosti a ekonomičnosti.

Klíčová slova

detekce, verifikace, eliminace, letiště, CUAS, UAS, UAV, hrozba

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to propose a defense strategy of Vaclav Havel airport Prague against UAS. The first part of the thesis addresses the importance of the largest airport in the Czech Republic and resulting need for its protection. The following section defines the CUAS. The thesis describes it's historical development and then divides the individual systems according to the technologies they use. Afterwards the defense strategy was created from the suitable systems. At the end of the thesis, the evaluation of the proposal was done in terms of range, scalability and economy.

Keywords

detection, verification, elimination, airport, CUAS, UAS, UAV, threat

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický název	Český název
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATZ	Aerodrome Traffic Zone	Letištní provozní zóna
CIWS	Close-In Weapon System	Zbraňový systém blízké ochrany
CTR	Control Zone	Řízený okresek letiště
CUAS	Counter UAS	Systémy proti bezpilotním prostředkům
DME	Distance Measuring Equipment	Vybavení pro měření vzdálenosti
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecká správa
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organisation	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
ILS	Instrument Landing System	Přístrojový přistávací systém
MTOW	Maximum Takeoff Weight	Maximální vzletová hmotnost
NDB	Non-Directional Beacon	Nesměrový radiomaják
PAR	Precision Approach Radar	Přesný přibližovací radar
RAF	Royal Air Force	Královské letectvo
RF	Radio frequency	Vysokofrekvenční vlny
RWY	Runway	Vzletová a přistávací dráha
UAS	Unmanned Aerial System	Bezpilotní systém
ÚCL	Civil Aviation Authority	Úřad pro civilní letectví České republiky
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range	Všesměrový radiomaják

1. Úvod.....	7
2. Letiště Václava Havla	9
2.1 Mezinárodní význam	9
2.2 Geografická poloha	9
2.3 Vývoj budov	10
2.4 Vývoj dráhového systému	11
2.5 Vývoj zabezpečovací techniky	13
3. CUAS.....	15
3.1 Counter Unmanned Aerial System	15
3.2 Hrozby UAS	17
3.2.1 Finanční ztráty	17
3.2.2 Újmy na zdraví a majetku způsobené pádem UAS	18
3.2.3 Špionáž	19
3.2.4 Přeprava zakázaného a nebezpečného nákladu	19
3.2.5 Vojenské UAS nesoucí zbraňové systémy	19
3.3 Historie CUAS	20
3.4 Detekční subsystémy	22
3.4.1 Radar.....	22
3.4.2 Optické senzory	23
3.4.3 Akustické senzory	23
3.5 Zásahové subsystémy	24
3.5.1 Rušení RF	24
3.5.2 Projektily	24
3.5.3 Laser	25
3.5.4 Síť	26
3.5.5 Mikrovlnné záření.....	27
3.5.6 Kolizní drony	28
3.5.7 Vysílání falešných signálů.....	28
3.5.8 Zvířata.....	28
3.6 Legislativní rámec.....	29
3.6.1 Doplněk X	29
3.6.2 Evropská legislativa.....	30
3.6.3 Budoucnost české legislativy	31
4. Návrh řešení.....	32
4.1 Současné vybavení PRG	32
4.2 Definování požadavků	32
4.3 Omezení	33
4.4 Použité systémy	33
4.4.1 Eagle.One	33
4.4.2 Hensoldt XPeller	35
Spexer.....	36
4.4.3 ApolloShield.....	36
4.5 Koncepce	38
4.5.1 Koncepce ApolloShield.....	38

4.5.2	Koncepce RF senzorů Hensoldt	39
4.5.3	Koncepce radarů Spexer	40
4.5.4	Koncepce Eagle.One	40
4.6	Vyhodnocení návrhu	41
4.6.1	Dosah	41
4.6.2	Finanční analýza	41
4.6.3	Škálovatelnost	42
4.7	Diskuze	43
5.	Závěr.....	45
	Použité zdroje.....	47
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek.....	51

1. Úvod

Bezpilotní systémy, někdy označované jako drony, se v poslední době těší velké pozornosti. Bezpečnostními složkami jsou využívány například při sledování chování řidičů na silnicích nebo dodržování zákazu vstupu do určených oblastí. V civilním sektoru jsou využívány například v zemědělství, ale také při kontrole technického stavu budov. U širé veřejnosti převládá obliba bezpilotních systémů pro natáčení a snímkování pomocí zabudované kamery. Pořízení UAS je velmi jednoduché a nevyžaduje žádné speciální zkoušky nebo certifikáty. Lidé, kteří operují bezpilotní letadla si často neuvědomují, že existují pravidla létání. Také nerespektují vyhrazené prostory, kde je létání zakázáno. Tato skutečnost by se mohla změnit s příchodem nové evropské legislativy, díky které budou muset operátoři splnit požadavky registrace a základní znalosti ohledně provozu UAS.

Motivací pro vypracování této bakalářské práce byl stoupající trend počtu incidentů způsobených UAS. I přesto, že již došlo k několika střetům s dopravními letadly a finanční škody způsobené uzavřením postižených letišť se počítají v řádech milionů amerických dolarů, je tomuto problému věnována stále malá pozornost.

Cílem práce bylo navrhnout zabezpečení letiště Václava Havla Praha proti bezpilotním prostředkům pomocí výběru vhodného systémového řešení integrujícího dostupné a budoucí technologie s integrací těchto technologií do celkového systému ochrany letiště.

Teoretická část práce se zabývá konceptem CUAS jako takovým. Byly popsány základní myšlenky těchto nových bezpečnostních technologií. Například je důležité, aby daná bezpečnostní strategie nevytvářela neúměrné riziko vedlejších škod. Dále jsem se zabýval historií konceptu CUAS, který svým způsobem vznikl již za druhé světové války. Následně byly CUAS koncepce rozděleny dle použité technologie, přičemž byly rozděleny na vhodné a nevhodné pro použití v rámci mezinárodního letiště.

V praktické části byly nejprve definovány nároky a omezení mnou navrženého systému zabezpečení. Následně byl vypracován návrh zabezpečení letiště Václava Havla proti bezpilotním prostředkům za použití vhodných a dostupných systémů. Poté byla provedena cost/benefit analýza, pro ověření, že je návrh vhodný i po ekonomické stránce.

Letiště Václava Havla bylo zvoleno, jelikož se jedná o největší a nejvytíženější letiště v České republice. Jedná se také o domovskou základnu leteckých společností České aerolinie a Smartwings. Toto letiště bylo zvoleno i z důvodu, že na něm již v minulosti došlo k narušení

leteckého provozu bezpilotním prostředkem. Stalo se tak 6. května 2016 v okolí prahu dráhy 12/30. V důsledku této události musely být odkloněny tři lety. [26]

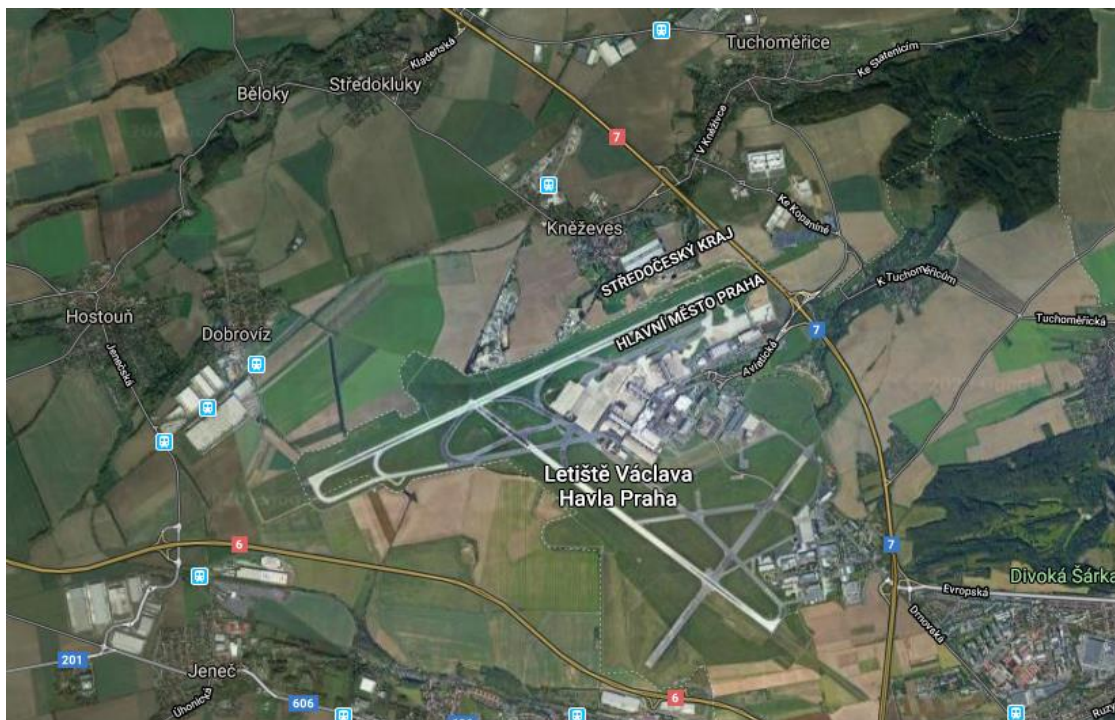
2. Letiště Václava Havla

2.1 Mezinárodní význam

Letiště Václava Havla je největší a nejfrekventovanější letiště v České republice. Letiště nese kódové označení LKPR dle ICAO a PRG dle IATA. V evropské konkurenci skončilo na 36. místě v počtu přepravených cestujících za rok 2019. Celkové pohyby v tomto roce dosáhly počtu 154 777, přičemž bylo přepraveno 17 804 900 cestujících a 81 768 tun nákladu. Oproti předchozímu roku počet přepravených cestujících vzrostl o 6% a množství přepraveného nákladu o 1%. [1] Spolu s plánovaným zahájením činnosti nové věže řízení letového provozu roku 2023 je počítáno s nárůstem počtu přepravených cestujících až na 21 milionů za rok. Počet pohybů by měl vzrůst ve stejném roce až na 70 pohybů za hodinu. V současné době jsou v provozu dvě vzletové a přistávací dráhy s označením 06/24 a 12/30. Třetí dráha s označením 04/22 je uzavřená z důvodu malé velikosti a špatného technického stavu. Letiště Václava Havla slouží jako hubové letiště pro letecké společnosti Smartwings, České aerolinie a Ryanair. Na pravidelných linkách odtud operují jedny z největších dopravních letadel světa. Jedná se o letouny Airbus A380-800 společnosti Emirates spolu s letouny Boeing 747-8 letecké společnosti Korean Air.

2.2 Geografická poloha

Letiště Václava Havla se nachází 12 km severozápadně od centra Prahy, v katastrálním území Ruzyně. Průměrná nadmořská výška letiště činí 380 m. n. m. Letiště zabírá celkovou plochu 9,2 km². Obvod perimetru letiště měří přibližně 25 km. V blízkém okolí se nachází vesnice Kněževes, Tuchoměřice, Dobrovíz, Hostivice a Jeneč. Nejbližší velkou pražskou čtvrtí je Zličín. Ve východní části perimetru letiště lemuje ochranný plot dálnice D7. Na jižní a západní straně lemuje obvod perimetru dálnice D6. Plochu okolo letiště zabírají louky a polnosti, které jsou využívány k zemědělské činnosti. Při výběru vhodného místa pro stavbu nového letiště v Ruzyni byl opomenut fakt, že je v tomto místě častější výskyt mlh, než kdekoli jinde v Praze.



Obrázek 1: Satelitní snímek letiště Václava Havla

2.3 Vývoj budov

Po velkou část existence první republiky byl veškerý letecký provoz v okolí hlavního města Prahy soustředěn pouze na letiště Kbely. V roce 1927 bylo během 230 dnů provozu zaznamenáno 47 000 pohybů letadel, což znamená 204 pohybů denně. Letiště Kbely operovalo v rámci 10 hodinového provozu, z čehož vyplývá, že ke vzletu nebo přistání letadla docházelo každé 3 minuty. Koncem tohoto roku bylo rozhodnuto, že bude vybudováno zcela nové letiště na místě, které umožní jeho další modernizaci s postupným rozvojem letectví.

V červenci roku 1933 započala výstavba nového letiště na pláních pražské Ruzyně. Výstavba trvala 44 měsíců, přičemž slavnostní zahájení provozu se konalo 5. 4. 1937. Jako první přistál letoun Československých aerolinií Douglas DC-2. Komplex letiště byl na svou dobu velmi moderní, díky čemuž se těšil velké pozornosti odborníků z celého světa a posloužil jako inspirace pro řadu evropských letišť. Na Mezinárodní výstavě umění a techniky v Paříži získala odbavovací budova nového letiště zlatou medaili. Po okupaci Československa za druhé světové války byla v Ruzyni dislokována německá letecká škola specializující se na školení posádek bombardérů. Ke konci války odtud operovala letka proudových stíhačů Messerschmitt Me-262. S postupem spojeneckých vojsk docházelo ke vzdušným soubojům i v blízkém okolí letiště, což vedlo k poškození jeho vybavení. Po osvobození bylo letiště svědkem návratu československých letců z Velké Británie, ale také přistání letounů Rudé armády.

Nejvyšší představitelé obnoveného státu si uvědomovali, že je nutné co nejdříve obnovit provoz letiště a zahájit jeho neodkladnou modernizaci. V této fázi byly ke stávajícím hangárům A, B a C dostavěny ještě hangáry s označením D a E. Ke stávajícímu terminálu byla přistavěna provizorní odbavovací budova pro zvýšení kapacity odbavených cestujících. Zlomovým se stal rok 1956, kdy bylo rozhodnuto o výstavbě zcela nového terminálu v severní části areálu letiště, dnes označované jako příletová hala Terminálu T1. Ke slavnostnímu otevření došlo 15. června 1968. O rok později byl do provozu uveden nový hangár F, který je díky svým úctyhodným rozměrům 213 x 59 metrů využíván dodnes. Ve své době umožnil provoz velkých proudových dopravních letadel.

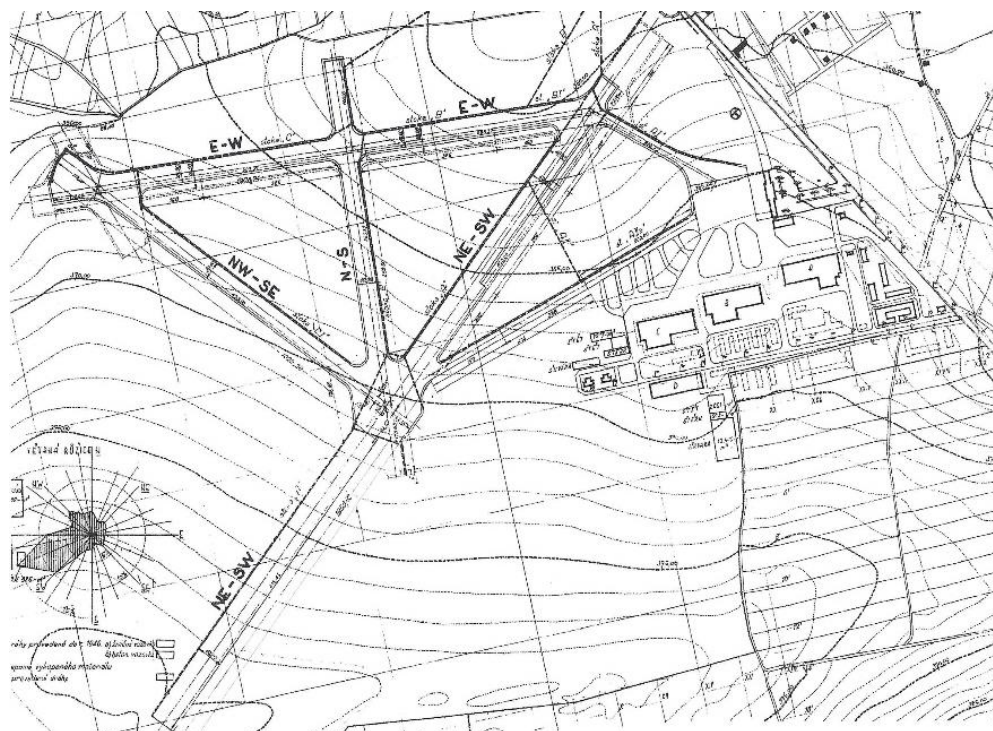
V 70. a 80. letech docházelo k postupné stagnaci vývoje letiště a jeho vybavení. K rozsáhlé přestavbě došlo až po sametové revoluci, kdy se skokově zvýšil počet cestujících, díky otevření státních hranic. V průběhu 90. let došlo k opravě a prodloužení hlavních RWY. Roku 1995 byla zahájena IV. etapa výstavby, v rámci které byl například opraven areál tzv. Staré Ruzyně. S příchodem tržní ekonomiky bylo nutné vybudovat samostatný cargo terminál a rozsáhlý komplex patrových garáží pro automobily cestujících. V novém tisíciletí byly z důvodu navýšení výkonů individuální přepravy vystavěny dva parkovací domy B a C. Dne 1. 9. 2005 byl oficiálně otevřen Terminál T2, který je v současné době využíván k odbavení letů do Schengenského prostoru. Dne 5. 10. 2012 došlo z iniciativy veřejnosti k přejmenování Letiště Ruzyně na Letiště Václava Havla.

Současný plán dlouhodobého rozvoje zahrnuje výstavbu objektů Airport City Sever a Jih, které by měly zahrnovat prostory pro trávení volného času cestujících, hotely, sportoviště a administrativní budovy. Současně proběhne rozšíření stávajícího Terminálu T2. Ke stávajícímu prstu D bude přistavěn ještě prst E. Bezpečnostní kontroly cestujících by se od jednotlivých gatů měly přesunout do nové jednotné centrální bezpečnostní kontroly, což se promítne ve 40% nárůstu odbavených cestujících. [2] [3]

2.4 Vývoj dráhového systému

Při otevření v roce 1937 disponovalo letiště 4 nezpevněnými RWY v délkách od 800 do 1200 metrů. Již po několika měsících od zahájení provozu bylo jasné, že s postupným zaváděním nových letounů pro civilní dopravu bude nutné stávající dráhy zpevnit a prodloužit. Práce na

dráhovém systému pokračovaly i za okupace, přičemž vycházely z předválečných projektů. Na konci války byly dokončeny 4 zpevněné RWY o délkách 950, 1000, 1300 a 1800 metrů.



Obrázek 2: Stav RWY v roce 1945 [2]

S příchodem nových dopravních letounů se ukázalo, že únosnost drah je dostatečná, nicméně je nutné RWY prodloužit. S příchodem proudových letadel byla v roce 1960 zahájena stavba zcela nové RWY 07/25 křížící stávající prodlouženou RWY 07/31. V průběhu 70. let proběhla řada oprav a prodloužení hlavních RWY. Roku 1981 oficiálně zanikla RWY 08/26 vybudovaná roku 1937. Stejný osud potkal i RWY 04/22, která v současné době slouží pouze jako pojezdová dráha a pro parkování velkých letadel. Roku 1993 se díky magnetické deklinaci změnilo označení RWY 07/25 na 06/25. RWY 13/31 byla ze stejného důvodu přeznačena na 12/30 v květnu roku 2012.

Do budoucna se počítá s vybudováním paralelní RWY 06R/24L určené primárně k přistávání letadel. Měla by se nacházet 1525 metrů jižně od současné RWY. Její délka by měla být 3550 metrů, přičemž by v obou směrech měla být vybavena zařízením ILS CAT IIIB ICAO. Její výstavbu ovšem brzdí stížnosti obyvatel okolních obcí, kteří se obávají zvýšení hlukové zátěže, způsobené vzlety a přistáními dopravních letadel. [2] [3]

2.5 Vývoj zabezpečovací techniky

V době zprovoznění letiště Ruzyně se letecká navigace spoléhala hlavně na světelné soustavy, které umožňovaly vzlety a přistání za snížené viditelnosti. Na střeše hangáru A byl instalován zábleskový maják, který bylo možné vidět až ve vzdálenosti 50 km od letiště. Obvod letiště označovaly po 100 metrech umístěné sodíkové lampy vydávající jasné žluté světlo. Pojezdové a odbavovací plochy byly osvětleny světlomety umístěnými na budovách okolo nich. Na jedné RWY se dokonce nacházel středový pruh světél pro snadnější přistání za zhoršené viditelnosti. Telefonní a radiové spojení zajišťovalo komunikaci s okolními letišti. Krátkou dobu před okupací byl instalován středofrekvenční rádiový zaměřovač u obce Středokluky, který zlepšil navigaci za letů v noci nebo za snížené viditelnosti.

V roce 1948 byl příletový směr 22 vybaven přibližovací světelnou soustavou a systémem SCS 51 americké výroby, ze kterého později vzešel systém ILS. RWY 13/31 byla v roce 1956 vybavena přibližovacími radiomajáky KRM/GRM sovětské výroby, které byly nedlouho poté nahrazeny systémem ILS, jelikož nesplňovaly podmínky stanovené ICAO. V dalších krocích modernizace byly nesměrové majáky NDB doplňovány a poté nahrazovány systémy VOR a DME. V roce 1958 byl na řídicí věž instalován přesný přibližovací radiolokátor RP2, který by se v terminologii ICAO dal označit za PAR – Precision Approach Radar. V roce 1972 byl uveden do provozu nový technický blok, ve kterém byla sdružena služba řízení letového provozu a meteorologická služba. Roku 1975 byly podniknuty kroky k modernizaci zabezpečovací techniky na letišti Ruzyně včetně zprovoznění RWY 13/31 dle CAT II ICAO. I přes všechny snahy se nakonec nepodařilo splnit požadavky na spolehlivost a dráha tedy nadále splňovala pouze podmínky na provoz podle CAT I ICAO. Tohoto roku byl instalován první sekundární radar firmy AIL.

Dne 2. 1. 1977 došlo na prahu dráhy 13/31 ke srážce letadel Tu-134 a Il-18. Viníky nehody byly označeni dva řídicí letového provozu, ale také absence pojezdového radaru. Ten byl proto urychleně roku 1980 nainstalován. Roku 1997 byla RWY 06/24 klasifikována na provoz dle CAT III/B ICAO. O rok později zahájila činnost Letištní služba řízení letového provozu. Došlo také k modernizaci zabezpečovací techniky.

Roku 2018 započaly přípravy stavby nové věže řízení letového provozu. Stávající věž měří 50 metrů, přičemž nová věž by měla měřit 80 metrů, což poskytne řídicím letového provozu lepší výhled na provozní plochy letiště. Věž, ve které sídlí středisko řízení letového provozu nyní,

bude sloužit jako výcvikové a záložní stanoviště. Samotná stavba by měla začít v tomto roce. Zahájení provozu nové věže je naplánované na rok 2023. [2] [3]

3. CUAS

3.1 Counter Unmanned Aerial System

Mezi systémy proti bezpilotním prostředkům (CUAS, Counter Unmanned Aerial System) řadíme systémy, které jsou schopny detekce, sledování, identifikování a případně následného zásahu proti UAS. Může se jednat o starší prověřené systémy, které byly pouze upraveny pro použití v rámci CUAS, ale i o systémy speciálně vyvinuté k tomuto účelu. V teoretické rovině existují pouze dva způsoby zásahu proti UAS. První možnost je dron fyzicky zlikvidovat za použití střelné zbraně, řízené střely, energetického pulsu nebo sítě. Druhá možnost spočívá ve využití nedokonalostí v konstrukci UAS. Bepilotní letadlo je velmi složitý systém, který obsahuje velké množství jednotlivých senzorů, navigačního vybavení a také centrální počítač, který je zodpovědný za zpracování příchozích dat a jejich následné odeslání. Každý z těchto subsystémů je náchylný k rušení nebo oklamání. Většina komerčních UAS využívá k dálkovému ovládní technologii radiových vln. Použití vlastních senzorů RF nám umožňuje určit přesnou frekvenci, na které daný UAS operuje. Rušením této frekvence můžeme přerušit komunikaci mezi UAS a jeho operátorem, ba dokonce převzít nad bezpilotním letadlem kontrolu. Zmást senzory UAS lze i například vysláním falešného GPS signálu, čímž můžeme letoun nasměrovat do určité oblasti, kde dojde k následnému zásahu proti němu.

Ve vztahu k letecké dopravě lze CUAS přirovnat k biologické ochraně letišť. Jedná se o službu, kterou zajišťuje dané letiště za účelem zvýšení bezpečnosti leteckého provozu. Tato činnost zaměstnává velké množství lidí po celém světě a přináší enormní finanční náklady. Odhaduje se, že každoročně způsobí srážky se zvěří škodu přesahující 1,2 miliardy amerických dolarů. [4] S postupujícím vývojem bezpilotních systémů a jejich rostoucími počty je vysoce pravděpodobné, že krom kontroly ptactva v okolí letišť vzniknou nové skupiny zaměřující se na ochranu letišť před bezpilotními systémy. Nehod způsobených srážkou s UAS je zatím evidováno málo, nicméně můžeme pozorovat vzestupný trend. [9] Pokud nebudou zaváděna nutná protipatření, tak je skoro jisté, že tato čísla budou dále strmě stoupat.

Protidronové systémy vycházející z vojenského prostředí se velmi liší od systémů určených pro civilní použití. Vojenské systémy jsou zpravidla navrhovány jako obrana proti cíleným útokům, které mohou přijít ze strany jiných států nebo teroristických skupin. V případě těchto útoků je poměr nebezpečí ze strany UAS a rizika vedlejších ztrát nesrovnatelně menší, tudíž je s ním do jisté míry počítáno. Místa použití těchto systémů jsou většinou odlehlé základny uprostřed

neobydlených oblastí. Civilní CUAS systémy sází převážně na virtuální způsob vypořádání se s narušitelem. Důvodem může být i fakt, že civilní společnosti nemají přístup k vojenským technologiím. V roce 2018 více jak polovina známých CUAS systémů využívala technologii rušení RF. Je to jednoduchý princip a navíc je to efektivní řešení v poměru cena/výkon.

V závislosti na tom, zda se oblast ochrany proti UAS mění, lze systémy rozdělit na mobilní a stacionární. Mobilní systémy dosahují zpravidla menších dosahů a výkonů, jelikož jsou kladeny nároky na jejich malé rozměry, ale také jelikož musí být použity mobilní zdroje elektrické energie. Tyto systémy jsou využívány například při transportu důležitých osob, kdy jsou instalovány přímo v jednom z vozidel konvoje. Takovým systémem je například DroneSentry-X z produkce společnosti DroneShield. Přístroj váží přibližně 10 kg a lze jej jednoduše přidělat na střešní nosič automobilu. DroneSentry-X dokáže detekovat UAS až do vzdálenosti 2 km za pomoci radaru. Následný zásah spočívá v rušení frekvencí, na kterých konvenční UAS operují, čímž přeruší komunikaci mezi UAS a jeho operátorem. [5]



Obrázek 3: Systém Drone Sentry-X od společnosti DroneShield [5]

Mobilní CUAS řešení umožňují nepřetržitou ochranu cíle po celé plánované trase. Existuje ovšem i skupina systémů, převážně se jedná o vojenské systémy, které jsou sice instalovány na vozidlech pro zvýšení mobility, nicméně nejsou určeny k použití za jízdy. Mobilní systémy mohou mít také podobnu ručních zbraní. Například DroneGun MkIII od společnosti DroneShield, který pracuje na principu rušení RF mezi bezpilotním systémem a jeho operátorem. Ruční systémy proti bezpilotním systémům našly své hlavní uplatnění u výjezdových jednotek bezpečnostních složek. Zvýšení mobility systému proti bezpilotním prostředkům lze dosáhnout také instalací daného systému na UAS. [6] Stacionární CUAS systémy dosahují zpravidla větších rozměrů. Využitím pozemních zdrojů elektrické energie lze docílit vyšších výkonů, které se projeví například ve vyšších dosazích detekčních subsystémů. Zvláštním případem je instalace původně stacionárních systémů například na paluby obchodních a vojenských lodí.

Pro zajištění dostatečné ochrany v rámci CUAS je jedním z důležitých parametrů rychlost, kterou dokáže systém reagovat na danou hrozbu. Limitujícím prvkem v rámci systému může být člověk. Lidský mozek potřebuje ke zpracování informace a následné reakci cenné vteřiny. Systém založený na rozhodování pomocí umělé inteligence nebo strojového učení vyžaduje čas v řádech milisekund. Přítomnost lidského elementu zvyšuje provozní náklady, které zahrnují například plat, ale i náklady na výcvik obsluhy systému. Na druhou stranu může být člověk jakousi pojistkou, aby nedocházelo k nechtěným škodám na majetku nebo zdraví osob v důsledku špatného rozhodnutí vzešlého z umělé inteligence. Jedním z hlavních kritérií je schopnost systému vrátit se do provozuschopného stavu poté, co provedl zásah proti UAS. To následně definuje, kolik jednotlivých UAS je systém schopný zachytit naráz. Integrita označuje schopnost systému monitorovat sám sebe a případně nahlásit, že nefunguje správně. V poslední řadě je výhodné, když je systém schopný se učit a využívat nabitě zkušenosti k vylepšení efektivity svého provozu.

3.2 Hrozby UAS

Pro účely této práce byla nebezpečí plynoucí ze strany UAS rozdělena do tříd dle podstaty hrozby, kterou představují.

3.2.1 Finanční ztráty

První a nejméně závažný druh hrozby spočívá v samotné přítomnosti bezpilotního letounu v daném prostoru. Operátor může do vyhrazeného prostoru vletět omylem, ale také úmyslně za účelem narušení určeného prostoru. UAS sám o sobě nemusí být nebezpečný, nicméně například v okolí letiště může hrozit srážka s dopravním letadlem. Nejčastějšími opatřeními bývá uzavření vzdušného prostoru v okolí letiště a uzemnění všech letadel. V důsledku této hrozby nedochází k poškození majetku nebo zdraví osob, nicméně dochází ke škodám finančním. V důsledku zavedených opatření ztrácí peníze letiště i letecké společnosti, které musí odkládat nebo rušit domluvené lety. Přestože již musely být kvůli narušiteli v podobě UAS uzavřeny například letiště New York, Dubai nebo Budapešť, zůstává stále nejvíce známým a medializovaným případem uzavření letiště Gatwick.

První incidenty spojené s narušením vyhrazeného prostoru letiště Gatwick pomocí UAS se odehrály již na začátku července roku 2017. Těmto událostem nebyla věnována dostatečná pozornost a veřejnost se o nich dozvěděla až v říjnu stejného roku. Větší dopad měly události následujícího roku. Mezi dny 19. a 21. prosince roku 2018 bylo letiště Gatwick několikrát

uzavřeno a následně otevřeno z důvodu pozorování neidentifikovaného UAS, který se opakovaně vracel do prostoru letiště. Z důvodu zachování bezpečnosti letového provozu musely být zrušeny odlety i přílety, přičemž některé lety byly odkloněny na okolní letiště. Celkem bylo událostí ovlivněno přibližně 1000 letů a 140 000 cestujících. Způsobená škoda byla o to větší, že se incident odehrál krátce před Vánoci, kdy je na letišti Gatwick velký provoz. Dle platných zákonů byla tato událost klasifikována jako nepředvídatelná událost. Z čehož plyne, že letecké společnosti nemusely vyplácet finanční kompenzace cestujícím, nicméně stále musely poskytnout stravu a ubytování. [7] Následné vyšetřování nepřineslo mnoho informací. Pouze byla vyslovena myšlenka, že je velmi pravděpodobné, že pachatel měl přesné informace o provozu na letišti i následném zásahu policie. Vždy když se schylovalo k znovuotevření letiště, tak se UAS objevil znovu. Také bylo zjištěno, že operátor dronu se nacházel s největší pravděpodobností ve vzdálenosti do 8 km od letiště. Příslušníci bezpečnostních složek se snažily problém vyřešit pomocí ručních CUAS, které měli k dispozici, nicméně bez úspěchu. Celou akci komplikovala absence přesného detekčního systému a poloha UAS byla zjišťována pouze z hlášení očitých svědků. Byla dokonce povolána armáda, která zde instalovala čerstvě zakoupený systém DroneDome od izraelské společnosti Rafael. Vyšetřování vyústilo pouze v zatčení manželského páru, který bydlel přibližně 2 km od letiště. Hlavní a jedinou stopou byla jejich všeobecně známá záliba v UAS. Po 36 hodin trvajícím výslechu byli manželé propuštěni na svobodu, přičemž v následných kompenzacích obdrželi částku ve výši 200 000 liber. [10]

I přes vylepšení zabezpečení letiště se situace v menší míře opakovala, když musely být 28. dubna 2019 odkloněny 3 lety poté, co jeden z pilotů nahlásil, že viděl UAS v blízké vzdálenosti od letiště. Přítomnost UAS nebyla v tomto případě potvrzena. [8]

3.2.2 Újmy na zdraví a majetku způsobené pádem UAS

Do druhé kategorie spadají případy, kdy dojde k pádu bezpilotního letadla na zem. To může být zapříčiněno nárazem UAS do překážky, vnějším poškozením UAS nebo vybitím akumulátoru bezpilotního letadla. K poškození majetku a zdraví osob nemusí dojít pouze při samotném pádu, ale teoreticky i na zemi, například při následném požáru UAS. Únik nebezpečných látek může znečistit životní prostředí. Při pádu na provozní plochu letiště mohou pozůstatky stroje způsobit proražení pneumatiky dopravního letadla nebo obdobně způsobit vykolejení vlaku při pádu na koleje. Zranění osob hrozí hlavně při létání nad velkými shromážděními lidí. Mohou to být například náměstí měst, koncerty nebo velké sportovní akce.

3.2.3 Špionáž

Třetí kategorie obsahuje nebezpečí plynoucí z využití palubní kamery integrované do UAS k natáčení osob nebo určité oblasti. Může se jednat o cílenou špionáž v blízkosti vládních budov, testovacích oblastí velkých průmyslových firem, ale také o sledování vojenských prostorů nepřítelem. V posledních letech se začaly množit případy, kdy bulvární novináři využili UAS ke sledování veřejně známých lidí. V reakci na tyto události vznikla řada civilních, cenově dostupných CUAS systémů zaměřující se na potírání těchto praktik.

3.2.4 Přeprava zakázaného a nebezpečného nákladu

Čtvrtou kategorií lze označit přepravu nákladu různého druhu pomocí UAS. Současná legislativa nedovoluje již samotnou přepravu balíčků pomocí UAS. Této techniky je využíváno v současné době hlavně k pašování kontrabandu přes hranice nebo do nápravných zařízení. CUAS ochrana věznic před vpašováním drog, zbraní a mobilních telefonů se stává vysokou prioritou. Nejčastějším řešením je rozšíření stávajícího rušení RF a mobilního spojení.

V předchozí kategorii byl hrozbou náklad na palubě UAS, který ale nebyl sám o sobě pro okolí nebezpečný. Většina komerčně dostupných UAS dokáže unést stovky gramů nákladu, který může sestávat například z výbušniny nebo jiného nebezpečného nákladu. Díky mobilitě UAS lze cílit na pohybující se vozidla nebo osoby, stejně tak na velká shromáždění osob.

3.2.5 Vojenské UAS nesoucí zbraňové systémy

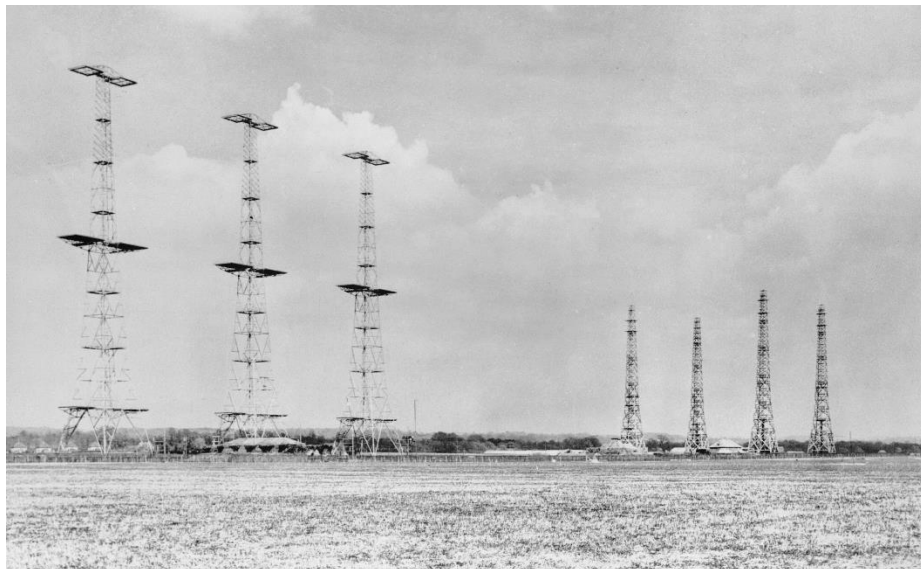
Do šesté kategorie spadají nebezpečí vycházející ze schopnosti UAS nést vlastní zbraňové systémy, primárně řízené střely. Obrana proti těmto sofistikovaným systémům je velmi náročná, ba dokonce nemožná. To se ukázalo 14. září 2019, kdy byl proveden útok pomocí UAS na ropná pole v Saudské Arábii. Dodnes není přesně známé kolik jich bylo, nicméně oficiální zprávy uvádí až 25 vojenských UAS a řízených střel. Přestože byla oblast v blízkém okolí ropných zařízení zabezpečena i za použití vojenských CUAS, nepodařilo se útočníky zastavit. V rámci útoku bylo zasaženo celkem 14 ropných nádrží a 3 další zařízení na zpracování ropy. [11]

3.3 Historie CUAS

Druhá světová válka přinesla velký technologický pokrok. Pod označením V-1 spatřil světlo světa první autonomní bezpilotní letoun. Písmeno V bylo zkratkou pro německé slovo Vergeltungswaffe, neboli odvetná zbraň. Trup byl vyrobený ze svařovaných plátů oceli a kvůli úspoře váhy i nákladů byla křídla dřevěná. Uvnitř trupu se nacházel celý mechanismus využívající gyroskopy, který měl za úkol udržovat letoun ve stabilním letu a následně ho převést do kontrolovaného pádu. V přídi byla nálož výbušniny Amatol 39 vážící 1000 kg. Do dnešní doby se jedná o jediný bojově nasazený letoun s pulzačním motorem. Ten dodával střele rychlost přes 540 km/h a dostup okolo 1000 metrů. Před vypuštěním bylo ručně nastaveno, kam má střela dopadnout. Po uletění určité vzdálenosti se vypl pulzační motor, zablokovalo se výškové kormidlo a střela přešla do pádu. Tato zbraň nebyla na dnešní poměry moc přesná. Z poválečné analýzy vyplynulo, že okruh dopadu se pohyboval od 7 do 19 mil.

Velmi brzy, jako odpověď na střely V-1, vznikl také první systém proti bezpilotním systémům na světě. Britský systém se skládal ze soustav radarů Chain Home, příslušníků Royal Observer Corps, systému protiletadlových baterií, přes 2000 přehradových balónů a stíhačů RAF. I v tomto případě můžeme rozdělit systém na prvky aktivní a pasivní, ale také na prvky vyhledávací a zásahové. Aktivními vyhledávacími prvky byly radary Chain Home, které pátraly po přilétávajících V-1 spolu s příslušníky jednotek Royal Observer Corps. Tito pozorovatelé využívaly pouze jednoduché nástroje jako dalekohledy nebo akustické zesilovače. Pro určení polohy objektu na obloze se využívalo kombinace známé výšky, ve které střely létaly a úhlu, který operátor naměřil od vodorovné roviny. Jednotlivé oddíly byly rozmístěny tak, aby každý kontroloval 10 až 20 kilometrů pobřeží. Postupně se jejich počet vyšplhal na 1500. V případě, že zpozorovaly nepřátelskou aktivitu, vystřelily do vzduchu světlici zvanou Snowflake, která měla za cíl upozornit stíhače na přítomnost létající bomby. Tento postup byl mnohem rychlejší než navazování radiového spojení, vzhledem k rychlosti V-1. Radiový kontakt byl navázán až následně k přesnému navedení stíhačů na cíl. Pasivním zásahovým prvkem byly přehradové balóny, jejichž ocelová lana měla střelu zneškodnit, pokud by do nich narazila. Méně účinným aktivním zásahovým prvkem byly na pobřeží rozmístěné protiletadlové baterie. Nejúčinnějším aktivním zásahovým prvkem celého systému byly stíhačky RAF. Díky vysoké rychlosti střely V-1 mohly být pro tento účel nasazeny pouze letouny Gloster Meteor, Hawker Tempest, North American P-51 a Supermarine Spitfire se speciálně upraveným motorem. Letouny Gloster Meteor byly za druhé světové války nasazeny pouze k tomuto účelu. Jejich piloti měli zakázáno létat nad území nepřítele, aby v případě sestřelení nepadly převratné technologie do rukou

nepřítele. Samotné zneškodnění střely probíhalo dvěma způsoby. V prvním případě se používaly hlavňové zbraně, které ale vystavovaly piloty stíhaček nebezpečí v podobě výbuchu nálože v trupu střely. Druhý způsob spočíval ve vychýlení střely z její plánované dráhy. Piloti museli přiblížit křídlo svého stroje dostatečně blízko ke křídlu střely, aby proud vzduchu způsobil její převrácení. Stabilizační systém na palubě nedokázal tak velký zásah do řízení vyrovnat a střela přešla do střemhlavého letu. Stíhači RAF drželi neustálou pohotovost. Denně to mohlo být až 500 bojových vzletů. Průměrně bylo každý den vystřeleno na Londýn 8-10 střel V-1. Z dnešního hlediska nebyl celý systém dostatečně účinný. Podařilo se zastavit pouze necelou třetinu vypuštěných střel. Londýn a přilehlé okolí jich zasáhlo 2419. Hlavním důvodem malé celkové úspěšnosti tohoto systému byl fakt, že z velké části přenos informací, jejich zpracování a následný zásah proti bezpilotnímu letadlu ležel v rukou lidí.



Obrázek 4: Antény radarů Chain Home [21]

I přes důkladné testování technologie bezpilotních letadel po skončení války, byl tento směr vývoje letecké techniky dán k ledu. V 60. a 70. letech 20. století zaznamenaly vzestup řízené střely vzduch-vzduch a země-vzduch. Díky jejich charakteru je ale dle definice nelze označit za bezpilotní prostředky. Systémy, které začaly vznikat jako jejich protipóly, se ale v dnešní době používají i v CUAS roli. V roce 1978 představila americká společnost General Dynamics systém Phalanx CIWS. Pasivním prvkem toho systému je radar, který sestává ze dvou antén. Nejdříve je aktivována přehledová anténa, která objekt sleduje a s pomocí počítače určí vzdálenost, rychlost a směr letu objektu. Pokud systém určí, že je cíl třeba eliminovat, je aktivována sledovací anténa, která je přesnější, nicméně má menší dosah. Aktivním prvkem je 20mm kanon M61 Vulcan s kadencí 3000 ran za minutu a maximálním dostřelem 3,5 km. Celý

system je schopný fungovat plně automaticky nebo poloautomaticky pod dozorem operátora. V případě, že je aktivovaný plně automatický režim, jsou stanoveny přesné podmínky, za kterých může být zahájena palba. Cíl se musí pohybovat směrem k systému na vstřícném kurzu. Zároveň jsou určeny minimální a maximální rychlosti cíle, kdy je možné na něj zaútočit. Původně byl tento systém navržený jako ochrana plavidel proti protilodním střelám a helikoptérám, nicméně v dnešní době je s ním počítáno i jako ochrana proti bezpilotním prostředkům. Existuje i skupina systémů využívajících řízené střely místo hlavních zbraní. Nejznámějším zastupitelem je americký systém MIM-104 Patriot. Výhodou řízených střel oproti hlavním zbraním je jejich dostřel, který může být i 160 km. Největší přelom nastal na přelomu 20. a 21. století s příchodem cenově dostupných UAS pro civilní potřebu. Vývoj systémů proti bezpilotním prostředkům zahájily i soukromé, civilní společnosti. V současné době je na trhu více než 500 CUAS systémů, které využívají nejrůznější metody a technologie. Kvůli překážkám v současné legislativě je většina těchto systémů pouze pasivních nebo využívají aktivní prvky civilního charakteru. To může zahrnovat rušení radiofrekvenčních vln, použití mikrovlňného záření nebo vysílání falešného signálu Go-Home.

3.4 Detekční subsystémy

3.4.1 Radar

Radar je jedním z nejpoužívanějších detekčních subsystémů v rámci CUAS. Zkratka anglických slov Radio Detection and Ranging označuje systém využívající odrazu elektromagnetických vln od objektů. Odražený signál je následně zachycen anténou a z doby potřebné ke zdolání cesty k objektu a zpět je vypočítána vzdálenost objektu od radaru. Využití tohoto fyzikálního jevu k detekci letícího objektu na velké vzdálenosti poprvé představili britští fyzici Robert Watson Watt a Arnold Wilkins roku 1935. Primární radar sestává pouze z dotazovače a antény, která zachycuje odražený signál. Díky jednoduchosti tohoto uspořádání dokáže systém určit pouze polohu a přibližnou velikost cíle. Více údajů o cíli jako je výška letu, magnetický kurz, indikovaná rychlost nebo vertikální rychlost poskytuje sekundární radar. Tyto informace jsou vysílány odpovídačem na palubě letadla jako odpověď na signál vyslaný dotazovačem radaru. Dalším typem je pasivní radar, který nevysílá, ale pouze přijímá radiovou komunikaci vycházející z letadla. K vypočtení polohy cíle je zapotřebí více stanic pasivních radarů a zároveň přesné určení polohy a času jednotlivých stanic. Pro určení 2D polohy je zapotřebí minimálně 2 stanic, dále pro určení 3D polohy alespoň 3 stanice pasivního radaru. Dnešní primární radary jsou schopné zachytit letící objekt na desítky až stovky kilometrů.

Nicméně s větším dosahem radaru klesá jeho schopnost zachytit menší cíle. Proto radary schopné zachytit průměrně velké UAS mají dosah pouze v řádu jednotek kilometrů. Zvýšení rozlišení radaru je dosaženo snížením vlnové délky vysílaného vlnění. Nedokonalost radaru využívá technologie stealth. Základním protiopatřením proti radaru je samotný tvar letadla. Letoun by měl mít takový tvar, aby se zpět k anténě radaru odrazilo pouze minimum paprsků. Na letounu by tudíž mělo být co nejméně malých výstupků a ostrých hran. Stealth letouny mají výzbroj vždy uloženou v pumovnicích. Dále jsou na povrchu letadel využívány materiály, které špatně odráží nebo dokonce pohlcují radiové vlny. Další metoda spočívá v instalaci rušičky na palubě stroje, která vysílá stejné vlny, které se odráží od letounu, nicméně v opačné fázi. Tím se oba signály vzájemně vyruší a anténa radaru nic nezachytí.

3.4.2 Optické senzory

Další možností systému CUAS jsou optické senzory. Za použití kamer je monitorována oblast pod a nad horizontem v okolí systému. Systém za pomoci umělé inteligence vyhledává pohybující se objekty a zjišťuje jejich parametry jako například rychlost, směr letu, tvar a siluetu objektu. Silueta je dále porovnávána s databází současně známých a používaných UAS. Pro správnou funkčnost systému je nutné průběžně aktualizovat tyto databáze. Účinnost optických senzorů je omezena sníženou viditelností, která může být způsobena tmou nebo například mlhou. Z tohoto důvodu bývají tyto senzory doplněny termovizemi. Termovize dokáže ale detekovat pouze bezpilotní letadla se spalovacími motory. UAS využívající baterie a elektromotory se zahřívají méně. Mají zpravidla teplotu podobnou okolnímu prostředí a tudíž mohou splynout s okolím. Termovize nedokáže ve většinu případů oddělit ptáka a UAS. Ptačí peří slouží jako skvělý izolant a zvíře tudíž nevyzařuje téměř žádnou energii.

3.4.3 Akustické senzory

Pomocí mikrofونů jsou snímány zvuky v okolí, zvláště pak specifické zvuky motorů UAS. Nahrávky jsou následně porovnány s knihovnou zvuků nejpoužívanějších modelů UAS. Funkčnost těchto systémů je také omezena zvýšenou úrovní hluku v okolí senzorů. Tyto systémy se tím pádem nehodí do okolí nádraží, velkých dopravních tepen nebo letišť.

Společným nedostatkem optických a akustických senzorů je princip jejich činnosti. Získané informace jsou porovnávány s knihovnamí siluet a zvuků typických pro bezpilotní letadla. V současné době je vývoj UAS velmi rychlý. Každý rok jsou představeny a následně uvedeny na trh stovky nových modelů. Jedná se o výrobky světoznámých značek, společně s jejich lehce upravenými kopiemi. S příchodem dostupných hobby technologií, jakými může být například

3D tisk, není složité si navrhnout a následně vyrobit vlastní tvar trupu UAS, který je následně velmi obtížně identifikovatelný a porovnatelný.

3.5 Zásahové subsystémy

3.5.1 Rušení RF

K dálkovému ovládní UAS se běžně využívá radiových vln (Bluetooth, Wi-Fi, GPS atd.). Většina výrobců využívá technologii rádiových vln v rozmezí frekvencí 2,4 – 5,8 GHz. Pro přerušení spojení mezi operátorem a UAS lze využít rušičky radiových vln. Existuje více druhů rušení, nicméně nejpoužívanějším typem je vytváření umělého šumu, který přehluší původní signál. Pro efektivnější provoz bývají rušičky párovány s detektory radiových vln, které dokáží určit přesnou frekvenci, na které daný UAS operuje a následně rušit pouze malých rozsah frekvencí. Při ztrátě signálu od operátora může UAS reagovat několika způsoby. Systémy obsahující Go-Home nastavení se vrátí na předem nastavenou polohu. Jinou reakcí může být, že se bezpilotní letadlo zastaví na místě, což ulehčí případný zásah za použití dalšího CUAS systému. Dokonalejší systémy umožňují dokonce převzít kontrolu nad UAS a následně s ním bezpečně přistát. Použití rušičů radiových vln je v blízkosti letiště velmi riskantní. Případný zásah proti UAS by mohl omylem zasáhnout komunikační a navigační zařízení, která jsou využívána během vzletu a přistání letadel. Rušením frekvencí 2,4 – 5,8 GHz mohou být zasaženy letištní radary a spolu s nimi přerušena radiová komunikace mezi řídicími letového provozu a posádkami letadel. Radiová komunikace je také využívána pro komunikaci pozemních bezpečnostních složek a handlingových služeb. Pro snížení vedlejší účinků jsou využívány směrové rušičky. Kvůli nebezpečí plynoucího z rušení radiových vln je ve většině zemí světa nezákonné pro civilisty používat tyto technologie.

3.5.2 Projektily

Hlavnových zbraní k zásahu proti UAS se využívá převážně u vojenských systémů. Jejich použití je velmi omezené z důvodu rizika způsobení nechtěných vedlejších škod na majetku nebo zdraví osob. Používané projektily lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou průbojné střely, které ničí cíl pouze přímým zásahem. Z tohoto důvodu se zpravidla používají zbraňové systémy, které mají velkou kadenci a tím pádem zvyšují šanci zásahu. V současné době převládá strategie, kdy průbojné střely mají za úkol daný cíl pouze zneškodnit a z tohoto důvodu neobsahují žádnou zápalnou nebo výbušnou složku, která by mohla iniciovat sekundární výbuch potenciální výbušniny na palubě UAS. Opačnou strategií je využití

projektilů, které automaticky vybuchnou v blízkém okolí cíle. Tato kategorie munice se označuje anglickým slovním spojením proximity fuze. Vyšší přesnost střelby znamená úsporu munice.

3.5.3 Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, neboli LASER označuje fyzikální princip, při kterém je vytvářen ustálený proud fotonů. Při dostatečném výkonu je tento proud fotonů schopný řezat nebo proniknout skrz velmi pevné materiály. Technologie laseru je stará již desítky let, nicméně její využití v CUAS systémech je stále na experimentální úrovni. Lasery se dělí do 4 výkonnostních tříd, přičemž nejvyšší třída IV obsahuje lasery, jejichž výkon přesahuje 0,5 W. Přestože hodnota 0,5 W tvoří spodní hranici nejvýkonnější třídy, jedná se o výkon poměrně malý. [24] V současné době testované lasery určené k ničení nízkoletících cílů dosahují výkonů v řádech desítek kilowattů, například americký systém AN/SEQ-3. Ten americké námořnictvo poprvé otestovalo roku 2014, přičemž systém zvládl úspěšně zneškodnit bezpilotní letoun ScanEagle i řízenou střelu směřující k plavidlu, na kterém byl systém instalován. [20]



Obrázek 5: Systém AN/SEQ-3 [20]

Do budoucna se předpokládá, že lasery plně nahradí zbraňové systémy využívající projektily a řízené střely. Hlavní výhodou laseru je, že ke svému provozu nevyžaduje přísun munice, což snižuje cenu provozu zbraně. Jediná průbojná střela do rotačního kanonu stojí i desítky dolarů, oproti tomu jeden výstřel laseru stojí pouze desítky centů. Použití těchto systémů je nicméně

limitováno i meteorologickými podmínkami na daném místě. Při průchodu paprsku vzduchem dochází k jeho rozptylu, což musí být kompenzováno vyšším výkonem laseru. V případě, že se ve vzduchu nachází vyšší množství malých pevných částic, například během písečné nebo sněhové bouře, může dojít i k úplnému zablokování paprsku. Při použití v civilním sektoru je nutné si uvědomit, že stejně jako střelné zbraně, může laser napáchat vedlejší škody na majetku i lidském zdraví. Ty mohou být způsobeny samotným laserem, ale také pádem zasaženého UAS. S postupným vývojem laserové technologie se začínají objevovat i způsoby, jak bezpilotní letouny proti zásahu laseru ochránit. Základním opatřením je zesílení konstrukce letounu nebo vyrobení trupu z kompozitních materiálů, který dokáže zásahu laseru odolat. Spolu se speciálními nátěry a povrchy dochází k rozložení energie laserového paprsku na větší plochu, což snižuje jeho účinek. Dále je možné naprogramovat pohyb letounu tak, aby náhle a rychle měnil směr pohybu, což znesnadňuje udržení laserového paprsku na jednom konkrétním místě.

3.5.4 Sít'

Když začaly přicházet na trh první systémy primárně určené proti UAS, nezanedbatelná část z nich využívala vzduchový kanon, který vystřeloval sít'. Účelem tenkých vláken, ze kterých je sít' zpravidla vyrobena, je se zamotat do vrtulí bezpilotního systému, který následně spadne k zemi. Pokročilejší verze mají zabudovaný i malý padák, který zbrzdí pád zasaženého letadla. To následně umožňuje UAS zabavit a určit jeho majitele. S příchodem nové evropské legislativy bude povinné UAS registrovat, čímž se hledání majitele výrazně zjednoduší. Provedení v podobě ručního raketometu našlo uplatnění u výjezdových jednotek bezpečnostních složek, kvůli své nízké ceně, vysoké mobilitě a snadné ovladatelnosti. Dostřel sítě bývá zpravidla okolo 20 metrů, což někteří výrobci kompenzují přimontováním již zmíněného vzduchového děla na bezpilotní letadlo. To umožňuje přiblížit se k cíli na menší vzdálenost a zvýšit tím šanci na zásah. Největší nevýhodou je, že většina systémů má kapacitu pouze na jednu střelu. Ruční provedení zbraně lze okamžitě znovu nabít a zkusit cíl trefit znovu. Nicméně když je vrhač sítě připevněn na bezpilotním letadlu, je nutné přistát, což trvá dlouho. Systém využívající tento koncept byl sestaven na Českém vysokém učení technickém v Praze na fakultě elektrotechnické. Pod označením Eagle.One se skrývá oktokoptyra, která je schopná i autonomního režimu, to znamená, že umí sama vyhledávat a zneškodňovat bezpilotní letadla ve vymezené oblasti. Sít' zůstává i po zásahu stále připevněna k oktokoptyře, aby nedošlo k pádu zasaženého UAS a jeho následné destrukci. Nicméně to znamená, že lze bezpečně zasáhnout pouze UAS menších hmotností.

3.5.5 Mikrovlnné záření

Elektromagnetické vlny v rozmezí od 1 milimetru do 1 metru se označují jako mikrovlny. Ve frekvenční oblasti mluvíme o rozmezí 300 MHz a 300 GHz. V rámci CUAS se využívají pár sekund trvající, vysokoenergetické výboje, které jsou vysílány v určitých směrech za účelem zasažení elektroniky uvnitř UAS. Vedoucí roli ve výzkumu protidronových systémů využívajících mikrovlnné záření zastává americká společnost Raytheon, která ve spolupráci s americkou armádou představila systém PHASER. Provedené testy ukázaly, že je tato zbraň schopna zasáhnout a spolehlivě zničit pomalu a nízko letící UAS. Zatímco laser je nutné pro zničení cíle udržet na cíli po dobu několika sekund, u mikrovlnných vln se doba snižuje na pouhou mikrosekundu. PHASER také dokázal zničit více UAS současně. Mikrovlnné vlny jsou totiž vysílány ve tvaru kužele, na rozdíl od laseru, který vysílá tenký paprsek, který dokáže mířit pouze na jeden cíl v danou chvíli. Současně je ovládání tohoto systému velmi jednoduché a intuitivní.



Obrázek 6: Systém PHASER od společnosti Raytheon [19]

Elektronické obvody uvnitř UAS lze ochránit před působením mikrovlnného záření několika způsoby. Nejefektivnějším způsobem je umístění elektroniky do Faradayovy klece. Faradayova klec odstíní mikrovlnné záření, nicméně nepropustí ani radiové vlny. K ovládání UAS je tedy nutné použít jiné způsoby ovládání. Kovová konstrukce Faradayovy klece také zvýší hmotnost, což ve výsledku sníží dolet a dostup UAS. Za účelem ušetření hmotnosti lze použít metalické nátěry, které ovšem nedosahují stejného účinku stínění jako Faradayova klec.

3.5.6 Kolizní drony

Slepou větví ve vývoji protidronových systémů jsou kolizní drony. Jedná se o zoufalé řešení, kdy řešíme narušení vzdušného prostoru cizím UAS způsobem, kdy využijeme vlastní bezpilotní letoun a do narušitele cíleně narazíme. Provést cílenou srážku s jiným UAS může být obtížné, nicméně i když se nám to nepodaří, tak to lze zkoušet znovu a znovu. Nevýhodou tohoto postupu je samozřejmě zničení obou bezpilotních letadel, přičemž může vzniknout vedlejší poškození majetku nebo zranění osob na zemi při pádu obou strojů. Kolizní drony byly využívány jako jeden z prvních CUAS systémů Policií ČR, nicméně se od jejich používání pozvolna upouští.

3.5.7 Vysílání falešných signálů

Sofistikovanější bezpilotní letadla mají širokou softwarovou výbavu. Jednou z užitečných funkcionalit je takzvaný Go-Home mód. Před vypuštěním UAS se nastaví lokace, do které se v případě potíží sám vrátí. Home lokace se může, ale také nemusí shodovat s místem vypuštění. Když například vypouštíme bezpilotní letadlo z lodi, tak nechceme, aby v případě ztráty signálu přistálo ve vodě na místě, kde se loď nacházela při vypuštění. Při sestavování CUAS strategie můžeme využít této technologie ve svůj prospěch. Na perimetr můžeme umístit vysílače, které budou vysílat umělý Go-Home signál. Samozřejmě bude toto řešení fungovat pouze v případě, že daný UAS bude obsahovat Go-Home mód a bude se jednat o neúmyslné narušení vzdušného prostoru. Když bude chtít útočník zakázaný prostor narušit cíleně, nic mu nebrání ve vypnutí Go-Home módu. Narozdíl od ostatních technologií se vysílání falešného Go-Home signálu perfektně hodí k použití v blízkosti letišť. Nedochozí k rušení stávajících signálů, které jsou důležité k bezpečnému letištnímu provozu.

3.5.8 Zvířata

Dravci jsou na letišti Václava Havla využíváni k plašení ptactva a jiných drobných živočichů již od roku 1979. S postupným vývojem bezpilotních letadel začaly vznikat plány na využití dravců k neutralizaci UAS v zakázaných prostorech. V roce 2016 představila nizozemská policie projekt Guard From Above, který si kladl za cíl cvičit orly mořské k plnění CUAS úkolů.



Obrázek 7: orel z projektu Guard From Above [22]

Sokolníci argumentovali výborným zrakem dravců a schopností s dronem v pařátech přistát, což eliminuje nebezpečí, že UAS na někoho nebo něco spadne. Také zaznívaly názory, že je pro dravce přirozené lovit kořist a že nezáleží, zda se jedná o živočicha nebo plastový stroj poháněný elektromotory. Po více než roce fungování byl projekt nicméně zrušen. Ukázalo se, že trénink dravců je zdoluhavý, nákladný a pro zvířata nebezpečný. Při nasazení v reálné situaci také vyšlo najevo, že dravci nejsou schopni plnit zadané úkoly mimo dobře známé prostory cvičišť. V případě, že dravec vyhodnotil zákrok proti UAS jako moc nebezpečný, tak se uchýlil k lovu náhradní kořisti. V současné době nizozemská policie zvažuje nákup CUAS technologií, které jsou založené na vystřelování sítí a rušení ovládacího signálu.

3.6 Legislativní rámec

3.6.1 Doplněk X

Hlavní legislativní kritéria týkající se bezpilotních letadel popisuje letecký předpis L2, Doplněk X. Ten obsahuje kategorizace a pravidla provozu bezpilotních letadel v rámci České republiky. Bepilotní letouny smí létat ve vzdušném prostoru třídy G. Ten sahá od zemského povrchu až do výšky 300 metrů. Dále je možné létat v letištní provozní zóně (ATZ, Aerodrome Traffic Zone) za předpokladu, že došlo k dohodě s provozovatelem neřízeného letiště. Provoz UAS v rámci řízeného okrsku (CTR, Control Zone) lze provádět pouze do výšky 100 metrů nad zemí a v horizontální vzdálenosti větší než 5500 metrů od vztažného bodu letiště. Je ale nutné předchozí povolení od úřadu pro civilní letectví spolu s povolením od příslušného stanoviště

řízení letového provozu. Výjimku tvoří provoz UAS do hmotnosti 0,91 kg. V tomto případě je povolený let do 100 metrů nad zemí v rámci CTR, ale mimo ochranná pásma daného letiště. [16]

V rámci Doplnku X je také zakázáno provozovat UAS mimo dohled pilota nebo určeného pozorovatele s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL. Z tohoto důvodu je zakázáno létání v noci a za podmínek snížené viditelnosti. Současná úprava zakazuje provoz UAS v autonomním režimu. [16]

3.6.2 Evropská legislativa

Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 si klade za cíl harmonizaci pravidel provozu UAS v rámci členských států Evropské unie. Původně mělo vstoupit v platnost již 1.7.2020, ale ve spojitosti s epidemií Covid-19 došlo k odložení až na 31.12.2020. Zatímco Doplněk X ukládal povinnost registrace pouze operátorům UAS, kteří je využívali ke komerční činnosti, nová evropská legislativa tuto povinnost ukládá až na výjimky všem operátorům UAS. Krom povinné registrace operátorů budou muset být všechny UAS viditelně označeny registračním číslem, které jim bude přiřazeno.

Tento právní dokument dále přináší kategorizaci UAS do tří kategorií. Jsou to otevřená, certifikovaná a specifická kategorie. Bezpilotní systémy spadající do otevřené kategorie nesmí být i nadále provozovány v blízkosti osob a nad shromážděními osob. Dále nesmí UAS spadající do otevřené kategorie přepravovat osoby nebo nebezpečný materiál. Nesmí také žádný náklad shazovat. Pro bezpilotní systémy spadající do certifikované a specifické kategorie je naopak povoleno přepravovat osoby i nebezpečný náklad. V případě určení UAS pro přepravu nebezpečného nákladu musí ale výrobce podniknout kroky pro snížení rizika pro třetí strany v případě nehody.

Otevřená kategorie je dále rozdělena do 5 tříd, označených C0 – C4. Hlavními parametry dělení jsou maximální vzletová hmotnost včetně účinného zatížení, maximální rychlost ve vodorovném letu, maximální dosažitelná výška nad místem vzletu a hluk, který UAS během provozu produkuje. UAS spadající do kategorií C1 a C2 budou muset být vybaveny zařízením, které umožní jejich průběžnou identifikaci a kontrolu na dálku. Vysílané informace budou obsahovat registrační číslo UAS i jeho provozovatele. Dále pak zeměpisnou polohu UAS i jeho operátora. Tyto informace musí být doplněny zaznamenanou dráhou letu od posledního vzletu UAS. Pro výrobce vyvstává také povinnost vydání příručky, ve které jsou uvedeny důležité informace jako například třída, hmotnost a hladina akustického výkonu UAS. [17]

Tabulka 1: Rozdělení UAS v otevřené oblasti

Třída	Podkategorie	MTOW	Maximální rychlost ve vodorovném letu	Povinná registrace operátora	Nutnost vybavení pro přímou identifikaci na dálku
C0	A1	< 250 g	19 m/s	Ne	Ne
C1		< 900 g			
C2	A2	< 4 kg	není definováno	Ano	Ano
C3	A3	< 25 kg			Ne
C4					Ne

3.6.3 Budoucnost české legislativy

Spolu se vstupem v platnost nové evropské legislativy zanikne účinnost Doplnku X. Nařízení Komise (EU) 2019/945 se zabývá pouze kategorizací UAS a registrací jejich operátorů. Z tohoto důvodu budou muset být napsány a schváleny dodatečné zákony zabývající se ostatními pravidly. Je velmi pravděpodobné, že jejich výklad bude podobný nebo dokonce stejný jako v Doplnku X.

4. Návrh řešení

4.1 Současné vybavení PRG

První zaznamenaný případ narušení vzdušného prostoru letiště Václava Havla se odehrál roku 2016. Od té doby byly testovány a dokonce již i instalovány první CUAS systémy. Pro ochranu tohoto pražského letiště je plánováno využití kombinace detekčních subsystémů, kterými jsou radary, RF senzory a kamery. Kombinací těchto tří technologií lze dosáhnout nejlepších výsledků. Kvůli zachování bezpečnosti nelze veřejně publikovat, o jaké konkrétní systémy se jedná. Krom samotných systémů spustilo letiště rozsáhlou kampaň s cílem edukace veřejnosti ohledně provozování UAS ve vyhrazených prostorech.

4.2 Definování požadavků

Mezinárodní letiště jsou v současné době ohrožovány úmyslnými, ale také neúmyslnými útoky ze strany UAS. Fanoušci letectví využívají palubních kamer k natáčení dopravních letounů během vzletů a přistání. Kvůli touze po nejlepších záběrech létají se svými UAS co nejlíže k dopravním letounům, čímž zvyšují nebezpečí srážky s nimi. Většinou k tomu využívají běžně dostupné UAS, které lze zakoupit v obchodech s elektronikou. Jedná se převážně o multikoptéry, které si uživatelé vybírají z důvodu snadné ovladatelnosti a letové stability. K jejich dálkovému řízení jsou využity rádiové vlny. Z hlediska CUAS je tento fakt pozitivní, jelikož multikoptéry dosahují menší rychlostí například oproti modelům letadel a rádiové vlny je možné detekovat. Multikoptéry byly také využity k úmyslným útokům na letiště Gatwick. Na tomto příkladu lze pozorovat, že narušitelské UAS nestačí pouze zahnat, jelikož se může opět vrátit zpět. Jedinou možností je proto dané UAS zajistit nebo zneškodnit.

Navržená CUAS koncepce by měla být schopna pokrýt celou oblast letiště Václava Havla. V ideálním případě by hranice detekce UAS měla sahát do dostatečné vzdálenosti za hranici letiště. Díky tomu bude UAS zachyceno ještě dříve, než naruší ochranou zónu letiště. Díky včasnému varování bude systém schopný reagovat a včas vyhodnotit vhodnou reakci na danou hrozbu. Srážka UAS s dopravním letounem v okolí letiště hrozí převážně v malých výškách. To znamená během vzletu a přistání. Systém by proto měl být schopný detekovat i UAS za hranicí perimetru letiště hlavně v osách vzletových a přistávacích drah.

4.3 Omezení

Jelikož se jedná o návrh zabezpečení velkého mezinárodního letiště, vyvstávají určitá omezení. V první řadě nelze použít systémy, které využívají k fyzické likvidaci narušitelského UAS projektily. Je nepřípustné střílet uvnitř letiště nebo v jeho blízkém okolí, z důvodu možnosti zásahu vybavení letiště, letadel nebo zúčastněných osob. Podobné omezení platí i pro použití laseru. Sice se nejedná o systém využívající projektily, nicméně nebezpečí nechtěného zásahu a následných vedlejších škod přetrvává. Při použití vystřelovací sítě se nutně zajistit, aby následný pád UAS nezpůsobil na zemi další škody. Nevyhovujícím řešením jsou i rušičky radiových vln, jelikož UAS zpravidla operují na frekvencích, na kterých fungují letištní radary. Během zásahu proti UAS přímo na letišti, by byly vyřazeny také radary letištní služby řízení, čímž může být narušena navigace také v řízeném okrsku letiště.

Z hlediska nevhodných detektorů se jedná především o akustické senzory. Hlavním důvodem je vysoká míra hluku v okolí letišť. Z důvodu častého výskytu mlh v okolí letiště Václava Havla je do jisté míry omezeno i použití optických senzorů. Použití akustických a optických systémů by také zvýšilo nároky na údržbu těchto systémů. Bylo by nezbytné neustále aktualizovat knihovny známých UAS.

Výsledná CUAS koncepce je také limitována omezenými místy, kam lze jednotlivé systémy instalovat. Plocha letiště je velká, nicméně je tvořena převážně provozními plochami, jako jsou vzletové a přistávací dráhy a pojezdové dráhy. V jejich blízkém okolí se nesmí nacházet žádné stavby ani překážky, které by ohrožovaly letový provoz. Nejvyšší stavbou na letišti Václava Havla je řídicí věž, která dosahuje výšky 50 metrů. Přítomnost této a ostatních budov, například terminálů, přináší komplikaci v případě použití radarů a optických detektorů. Vlny vysílané radarem nedokážou proniknout danou překážkou a tím pádem zachytit například UAS za ní. Tomuto jevu se říká radarový stín. V návrhu je nutně tento fakt kompenzovat využitím více antén, které díky překryvu zorných polí slepá místa vyplní.

4.4 Použité systémy

4.4.1 Eagle.One

V roce 2010 začal pod vedením Martina Sasky vznikat na fakultě elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém v Praze projekt se zaměřením na bezpilotní systémy. V samých počátcích se jednalo o vývoj a zdokonalování autonomního módu pro bezpilotní letouny. V srpnu roku 2016 vznikla první verze softwaru, díky kterému dokázal UAS sledovat jedoucí

vozidlo, aniž by předem znal jeho plánovanou trasu. Počátkem následujícího roku vyhrál tým částečně složený z vědců z ČVUT soutěž MBZIRC ve Spojených Arabských Emirátech. [12] V březnu stejného roku došlo k představení prvních UAS schopných autonomně detekovat, sledovat a neutralizovat bezpilotní letouny ve chráněné oblasti. V květnu 2018 již vzniká samotný letoun Eagle.One. V dubnu 2019 byla představena vylepšená verze Mark II, která se liší od předchozí verze hlavně lehčí a pevnější konstrukcí z uhlíkových vláken. Design navrhl Ing. arch. Lubomír Fiala. Následujícího měsíce byl tento koncept představen na mezinárodním veletrhu obranné a bezpečnostní techniky IDET v Brně.



Obrázek 8: Oktokoptéra Eagle.One [23]

Eagle.One je oktokoptéra poháněná 8 elektromotory. Lehká uhlíková konstrukce spolu s velkým výkonem umožňují dosáhnout rychlosti okolo 80 km/h. Při vývoji byl kladen důraz na redundanci pohonu a systém je díky tomu schopný fungovat i po selhání dvou motorů. Lithium-polymerové akumulátory umožňují provoz UAS až po dobu 40 minut. Zespolu UAS je připevněný vzduchový kanon schopný vystřelit síť z tenkých vláken až do vzdálenosti 10 metrů. Síť na rozdíl od konkurenčních systémů zůstává připevněna k Eagle.One, který tím pádem drží narušitelský UAS, čímž brání jeho pádu na zem. Tím lze zabránit potenciálním vedlejším škodám na zemi. Je nutné si také ovšem uvědomit, že to do jisté míry limituje použití Eagle.One. Je tím omezena hmotnost cíle, kterou dokáže Eagle.One udržet a být nadále schopný letu. Výrobce uvádí, že je jeho systém schopný zachytit cíl letící maximální rychlostí 62 km/h, který může vážit více než 15 kg. Pro nouzové případy je Eagle.One vybavený nouzovým padákem, aby v případě nepředvídatelné události nedošlo k jeho zničení v důsledku pádu. Uvnitř UAS se skrývá procesor INTEL Core i7 osmé generace, který poskytuje dostatečný výkon pro výpočty spojené s rozhodováním v rámci neuronové sítě. V rámci autonomního režimu je Eagle.One schopný lokalizovat cíl a zaměřit se na něj. Při samotném míření dochází

k přepočítání pozice cíle až 30krát za vteřinu. Open API umožňuje začlenění Eagle.One do větší koncepce CUAS zabezpečení. [13]

4.4.2 Hensoldt XPeller

V roce 2017 došlo k prodeji Airbus Electronics. Jednalo se o divizi spadající pod skupinu Airbus, která se zabývala vývojem a výrobou elektronických zařízení. Za částku 1,1 miliardy eur ji koupila americká investiční skupina KKR. Po prodeji došlo k přejmenování společnosti na Hensoldt, na počest Moritze Carla Hensoldta. Tento německý vědec se stal průkopníkem v oblasti optiky. Specializoval se především na výrobu a zdokonalování dalekohledů a dálkoměrů. V roce 2019 zaměstnávala společnost Hensoldt 5500 zaměstnanců a její roční výnos dosáhl hodnoty 1,14 miliardy eur. V současné době se společnost zaměřuje především na vývoj a výrobu radarových, optických a avionických systémů. Má za sebou i celou řadu dodávek a kontraktů pro německou armádu. Jedná se například o radarové vybavení víceúčelových letounů Eurofighter Typhoon. Optronické vybavení pocházející od společnosti Hensoldt můžeme najít v tancích Leopard, v bojových vozidlech pěchoty Puma, ale také v letounech Gripen a Rafale.

Co se týče CUAS koncepce, představila společnost Hensoldt jejich řešení v podobě systému XPeller. Řešení určené pro trvalou instalaci označuje výrobce jako XPeller Guard a řešení určené pro montáž na vozidlo jako XPeller Rapid. Je nabízeno i malé přenosné zařízení nazvané XPeller Gear. Uplatnění najde především u členů bezpečnostních sborů. Systém XPeller je modulární, což umožňuje poskládat řešení přesně na míru dané situaci. Také to výrazně ulehčuje modernizaci a rozšíření systému ochrany v případě potřeby. Hensoldt nabízí detekční subsystemy jako jsou radary, optické detektory, RF senzory v kombinaci se zásahovými subsystemy. Mezi ty patří rušičky RF, vrhače sítí, ale také systémy schopné lokalizovat polohu operátora daného UAS. Vzájemnou kompatibilitu a propojenost systému zajišťuje centrální řídicí jednotka C2.

Spexer



Obrázek 9: Radary Spexer 500 a Spexer 2000 [14] [15]

Řada přehledových radarů Spexer byla navržena pro sledování chráněných oblastí. V této kategorii radarů zastává společnost Hensoldt vedoucí pozici na trhu, jelikož její radary patří k těm nejlepším. V současné době existují tři modely – Spexer 360, 500 a 2000. Zatímco model Spexer 360 je schopný pokrýt celých 360° okolního prostoru, pozdější modely 500 a 2000 pokrývají pouze 120° výseč. To je kompenzováno mnohonásobně vyšším dosahem detekce. Všechny 3 modely pracují na frekvencích pásma X (8 – 12 GHz). Dopplerův radar umožňuje určit, zda jsou součástí cíle rychle se pohybující části například vrtule. Tímto procesem lze odlišit UAS od letícího ptáka. [14] [15] [18]

Tabulka 2: Modely radaru Spexer

Model	Spexer 360	Spexer 500	Spexer 2000
Maximální dosah detekce UAS (0,2 m ²)	1,6 km	2,5 km	9 km
Azimutální pokrytí	360°	120°	120°
Rozměry radaru	Ø586 x 262 mm	900 x 600 x 200 mm	1000 x 700 x 600 mm

4.4.3 ApolloShield

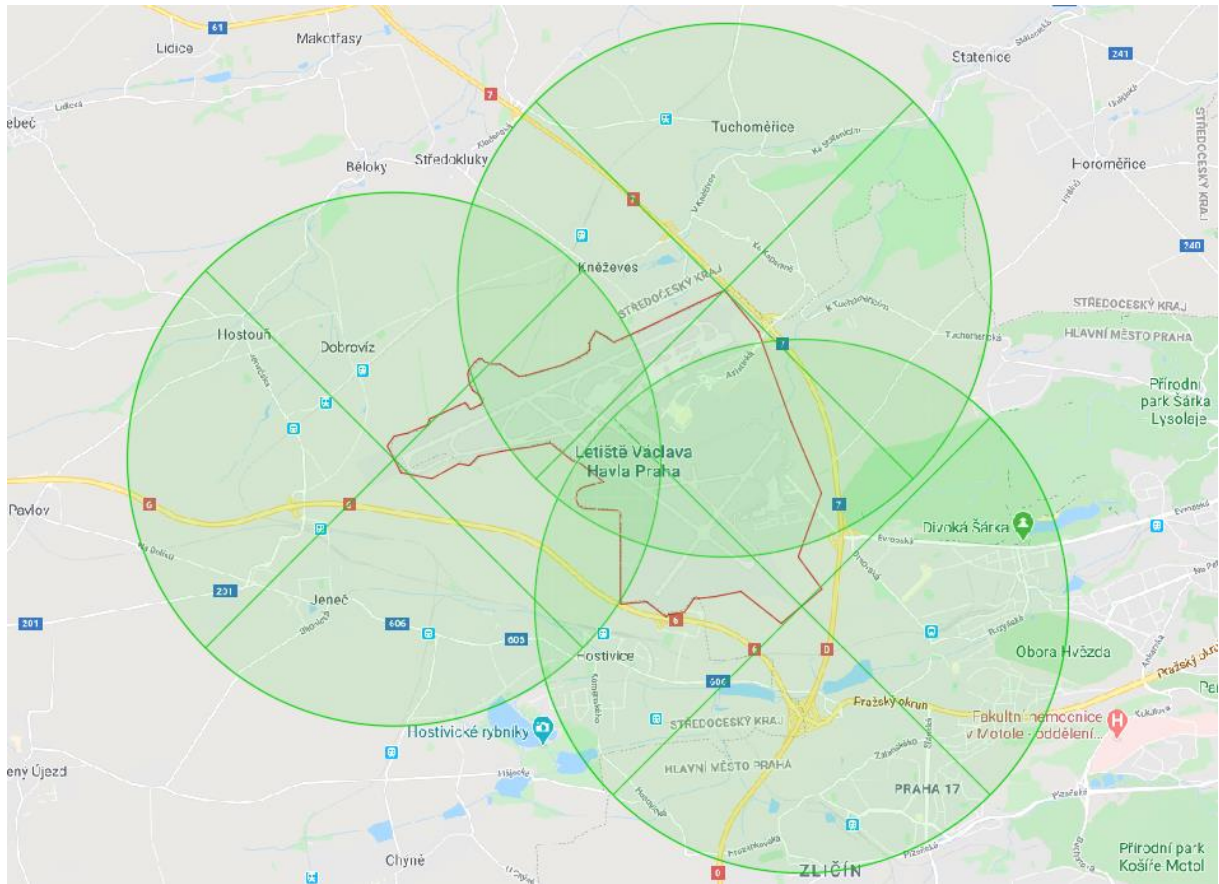
Společnost ApolloShield byla založena roku 2015 spoluzakladateli, kterými byli Nimo Shkedy a Gilad Beer. Nimo Shkedy je uznávaným odborníkem v oblasti bezpečnosti a problematiky bezpilotních letadel. Své zkušenosti získal při práci v Interpolu, kde vedl tým zaměřený na zavádění CUAS řešení v rámci Evropy a Spojených států amerických. Před založením

společnosti ApolloShield byl členem izraelských zpravodajských bezpečnostních složek, kde se mu dostalo uznání za odvedenou práci.

Pro vývoj systému získala společnost od svých investorů více než 500 000 amerických dolarů. Systém sestává z dvou částí. První část tvoří zařízení schopné detekovat radiové vlny používané k dálkovému ovládní UAS. Systém umožňuje detekovat a identifikovat nejznámější typy bezpilotních systémů. Každý UAS má své specifické ID, které systém dokáže rozpoznat. To může být posléze využito k dopadení operátora UAS. Po rozpoznání, o jaký konkrétní bezpilotní systém se jedná, začne ApolloShield vysílat falešný Go-Home signál pro daný typ UAS. Druhou částí systému je cloudové řídicí centrum, s jehož pomocí lze celý systém jednoduše ovládat. Na obrazovce se zobrazují jednotlivá detekovaná UAS spolu s informacemi o nich. Může se jednat o jméno výrobce a typ stroje, ID a jeho polohu na mapě. Následně lze zahájit vysílání Go-Home signálu. Jelikož dokáže systém rozeznat jednotlivé UAS od sebe, umožňuje toto řešení odlišit bezpilotní systémy, které mají povolení se v daném vzdušném prostoru nacházet. První prototypy dosahovaly detekce UAS pouze v rádech stovek metrů. Nejnovější verze systému ApolloShield dosahuje dosahu detekce až do vzdálenosti 3 km. Jedna jednotka tohoto zařízení stojí 100 000 amerických dolarů. Jednotlivá zařízení lze propojit do jednoho systému za účelem zvýšení chráněné oblasti. Díky OpenAPI dokáže systém komunikovat i s CUAS systémy od jiných výrobců.

4.5 Koncepce

4.5.1 Koncepce ApolloShield



Obrázek 10: Koncepce ApolloShield

V této koncepci je počítáno s instalací tří jednotek tohoto systému. Na oba konce RWY 06/24 je možné instalovat po jedné jednotce. Třetí jednotka systému ApolloShield by byla umístěna u jižního prahu dráhy 12/30. Díky dosahu detekce 3 km pokryje tato koncepce celou oblast letiště Václava Havla. Díky překrývajícím se zorným polím jednotlivých jednotek dochází ke zvýšení přesnosti celého systému. Umístěním před prahu jednotlivých drah maximalizujeme jejich dosah v ose dráhy vně letiště. V těchto místech dochází nejčastěji k pozorování narušitelského UAS.

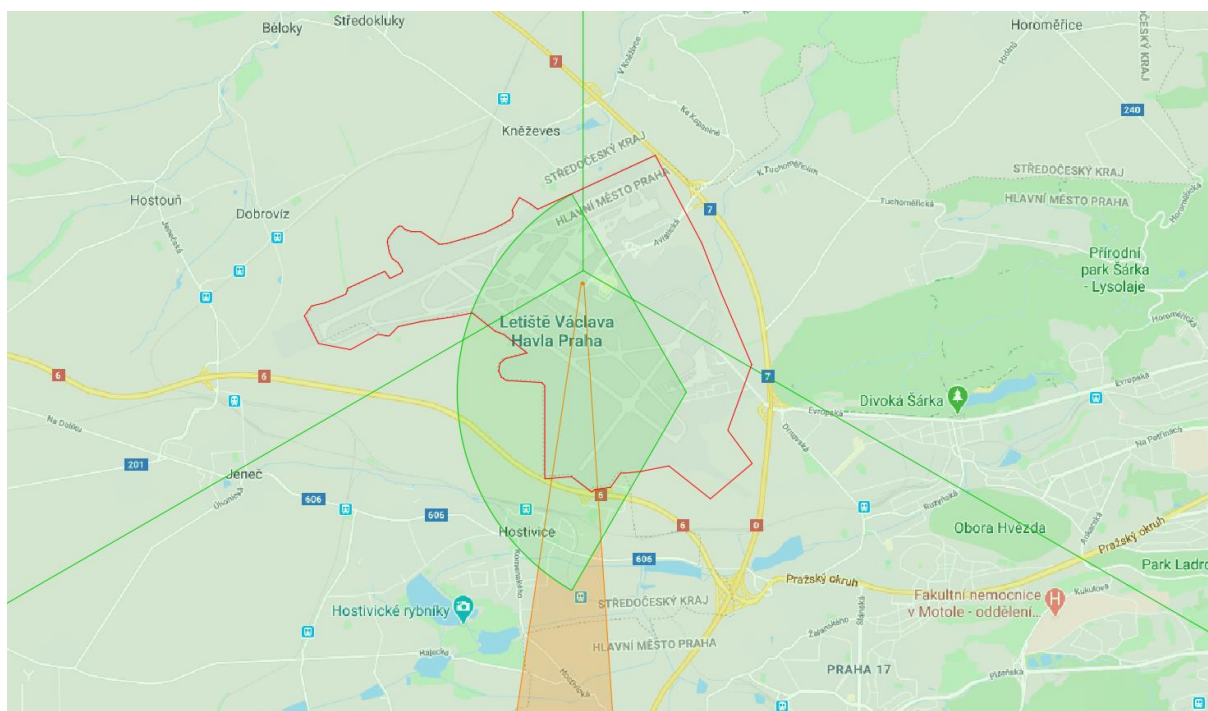
4.5.2 Koncepce RF senzorů Hensoldt



Obrázek 11: Koncepce RF senzorů XPeller

Senzory radiových vln od společnosti Hensoldt dosahují na rozdíl od předchozího systému vzdálenosti detekce pouze 750 metrů. Z toho vyplývá, že je nutné použít více jednotlivých zařízení, abychom pokryli celou oblast letiště. Pro pokrytí celého perimetru je nutné instalovat minimálně 10 jednotlivých zařízení. I přesto nebude pokryta celá oblast, především v oblasti protínání pojezdových drah L, P a Q. Také je na rozdíl od předešlého řešení omezena oblast detekce vně perimetru letiště. Větší počet jednotlivých zařízení zvyšuje nároky na vzájemné propojení a následnou údržbu.

4.5.3 Koncepce radarů Spexer



Obrázek 12: Koncepce radarů Spexer

Radary Spexer 360 nevyhovují pro použití v rámci rozlehlých oblastí, kterými je například letiště Václava Havla. Z důvodu malého dosahu by bylo nutné instalovat velké množství antén a to i do prostoru provozních ploch, kde by mohly tvořit překážky pro letový provoz. Proto byly při tvoření tohoto návrhu zvoleny výkonnější radary Spexer 500 a Spexer 2000. Instalací modelu Spexer 2000 na budovu terminálu docílíme detekce do vzdálenosti až 9 km. Omezené azimutální pokrytí v hodnotě 120° je nutné v návrhu kompenzovat umístěním tří antén vedle sebe. Za budovou věže řízení letového prostoru se vytváří oblast radarového stínu. Ten lze pokrýt instalací antény radaru Spexer 500 orientované na sever do prostoru Staré Ruzyně. Tento návrh splňuje požadavky na detekci UAS v rámci celé oblasti letiště Václava Havla. Jelikož je za určitých podmínek zakázáno létání UAS do vzdálenosti 5,5 km od vztažného letiště, je výhodné být schopen tuto kruhovou oblast kontrolovat.

4.5.4 Koncepce Eagle.One

Záchytnou funkci navrženého systému bude plnit oktokoptyra Eagle.One. Domovská základna byla zvolena v blízkosti budovy Terminálu 2, jelikož je to blízko geometrickému středu letiště Václava Havla. Maximální rychlost 80 km/h umožňuje oktokoptyře dosáhnout jakéhokoli bodu letiště v čase pod 2 minuty. Díky výdrži baterie dosahující 40 minut lze také narušitelský dron pronásledovat směrem zpět k jeho operátorovi. Je výhodné začlenit do námi navrženého

systemu dva kusy tohoto systému, aby v případě poruchy jednoho byl stále připravený druhý. Také to umožňuje zasáhnout proti dvěma narušitelským UAS zároveň.

4.6 Vyhodnocení návrhu

4.6.1 Dosah

Požadavkem návrhu ochrany letiště Václava Havla proti bezpilotním prostředkům bylo, aby byla pokryta celá jeho oblast. Tento požadavek naše řešení splňuje. Dokonce díky použití radarů Spexer 2000 umožňuje náš návrh detekovat narušitelské UAS až do vzdálenosti 9 km od vztažného bodu letiště. To umožňuje kontrolu prostorů, které jsou využívány především během vzletů a přistání dopravních letadel. Největší problém představoval radarový stín vzniklý za věží řízení letového provozu. Umístěním antény radaru severně od věže, vznikla slepá oblast na jih od věže ATC. V důsledku čehož radarový stín nezasahuje do rizikového prostoru ani jedné RWY.

Ve finálním návrhu byla upřednostněna instalace systému ApolloShield před podobným systémem od společnosti Hensoldt z důvodu lepších výkonů a vyššího dosahu. Umístěním jednotek systému ApolloShield před prahy drah jsme maximalizovali dosah detekce UAS směrem vně perimetru letiště. Díky výhodnému rozložení tří jednotek systému jsme docílili pokrytí všech rizikových oblastí před 4 prahy vzletových a přistávacích drah. I přesto, že před severní prah RWY 12/30 nebyla instalována žádná jednotka systému, vzniká tam paradoxně nejlepší pokrytí. Dochází tam k překryvu zorných polí jednotek, které jsou instalovány na obou koncích RWY 06/24.

Vyhodnotit dosah aktivního zásahového prvku, kterým je oktokoptéra Eagle.One, je obtížné. Při maximální rychlosti 80 km/h a maximální době letu 40 minut lze vyvodit, že se dosah systému pohybuje v řádech desítek kilometrů. Hlavním úkolem aktivního zásahového prvku je ochrana letiště. I přes velký dolet by se ale neměla oktokoptéra Eagle.One vzdalovat. Za prvé lze obhájit pouze zásah proti UAS, který se nachází ve vyhrazené oblasti letiště, tzn. ve vzdálenosti 5,5 km od vztažného bodu letiště. Zásah mimo tuto oblast je neopodstatnitelný.

4.6.2 Finanční analýza

Převážnou část celkových nákladů tvoří náklady pořizovací. V rámci rešerše bylo obtížné zjistit pořizovací cenu jednotlivých systémů. Ze vzájemné komunikace s výrobcí vyplynulo, že nám

to nemohou sdělit. Informace ohledně ceny poskytla pouze společnost ApolloShield. Další náklady zahrnou instalaci jednotlivých systémů.

Požadavkem na konečný návrh systému byly jeho nízké provozní náklady. Radary Spexer byly vybrány také proto, že využívají elektronické skenování namísto mechanického otáčení antény. Výrobce uvádí střední dobu mezi poruchami převyšující 5000 hodin. Jelikož současná legislativa neumožňuje autonomní provoz námi navrženého řešení, bude nutné vyčlenit obsluhu, která bude celý systém obsluhovat, z čehož budou plynout provozní náklady ve formě platu obsluhy.

Hlavním cílem námi navrženého systému zabezpečení je minimalizovat finanční náklady v případě, že je, díky přítomnosti narušitelského UAS, nutné letiště uzavřít. Pro tuto analýzu byla využita data z incidentu, který se odehrál na letišti Gatwick. Letiště samotné vyčíslilo škodu způsobenou 3 denním přerušením provozu na částku 1,4 milionu britských liber. Nejvíce poškozenou leteckou společností se stal easyJet, který má na tomto letišti domovskou základnu. Celková ztráta této letecké společnosti přesáhla 15 milionů britských liber. Odhaduje se, že celková škoda všech leteckých společností ovlivněných tímto incidentem se pohybuje v řádech desítek milionů liber. Ihned po incident zakoupilo letiště CUAS vybavení v ceně minimálně 4 miliony liber. [7]

Primárním úkolem našeho systému není zabránit srážkám UAS s dopravními letadly v blízkém okolí letiště. Nicméně díky výkonným radarům Spexer dokáže systém detekovat a následně varovat přilétající a odlétající letadla. Ta mohou být buď odkloněna na jiná letiště nebo vyčkat až hrozba v podobě UAS pomine. Podle výzkumu provedeného FAA má srážka s UAS horší následky než srážka s podobně velkým ptákem. Především při zásahu náběžných hran křídel došlo k proražení potahu a zaklínění UAS uvnitř křídla. Ve většině případů došlo k poškození lithiové baterie UAS. Následný požár uvnitř křídla, v blízkosti palivových nádrží, přímo ohrozil bezpečnost letu. I pokud by nedošlo k úplnému zničení letounu v důsledku pádu, následná oprava by přinesla vysoké finanční náklady. [27]

4.6.3 Škálovatelnost

Od samého počátku návrhu byl kladen důraz na možnost snadného rozšíření systému ochrany v případě, že dojde k rozvoji letiště. Nejbližším rozšířením letiště Václava Havla je stavba nové paralelní dráhy 06R/24L. Náš návrh umožňuje její kompletní pokrytí do stejné míry jako stávající RWY 06/24 bez výrazných změn systému.

Systémy ApolloShield a Eagle.One disponují rozhraním OpenAPI, které je umožňuje propojit do jednoho většího celku. Radary Spexer sice nejsou vybaveny rozhraním OpenAPI, nicméně jsou také uzpůsobeny k začlenění do většího systému ochrany s využitím řídicí jednotky C2. V případě potřeby lze jednoduše instalovat další antény systému ApolloShield, stejně tak antény radarů Spexer.

4.7 Diskuze

Z provedeného vyhodnocení návrhu vyplývá, že navržené řešení je správné a v praxi použitelné. V současné době je složité obhájit instalaci takto nákladného systému. Security opatření se zavádí většinou až ve chvíli, kdy k podobnému útoku skutečně dojde. Gatwick sice do kategorie security zapadá, jelikož se jednalo o úmyslný útok na civilní letectví. Nedošlo ale k poškození majetku nebo zdraví osob, tudíž to nemělo takový dopad. Pro obhájení takového systému je nutné pohlížet na věc z pohledu safety, kdy UAS představují nebezpečí samy o sobě, například při nárazu do dopravního letounu.

Díky současné legislativní situaci se letiště zaměřují především na detekci a verifikaci cíle, v tomto případě narušitelského UAS. Současná legislativa totiž klasifikuje zničení UAS jako útok na civilní letectví. Pro vyšší efektivitu detekce a verifikace je nutné zkombinovat více systémů dohromady. V současné době jsou naděje vkládány nejvíce do radarů, detektorů RF a kamer. Radary a detektory RF mají za úkol detekovat UAS. Kamery mají na starost ověření, že se skutečně jedná o UAS, a ne o letícího ptáka. V současné době jsou uvažovány pouze tyto tři technologie pro použití v rámci zabezpečení civilních letišť. Jestliže nedojde k vývinu nějaké další technologie, bude zdokonalování těchto koncepcí závislé pouze na postupném vývoji těchto tří dílčích technologií.

Návrh byl vypracován pro použití ve velmi specifických podmínkách mezinárodního letiště. Tyto podmínky lze charakterizovat jako velkou plochu, ze které zabírá zástavba pouze malou část. Zároveň nelze použít systémy, které by vytvářely riziko vedlejších škod na majetku a zdraví. Navržený systém by se mohl využít například při ochraně solárních elektráren nebo vodních nádrží sloužících jako zdroje pitné vody. Oba tyto příklady se podobají letišti v tom, že zabírají velkou plochu, která neobsahuje velké množství překážek, které by komplikovaly použití radaru. Zároveň při zásahu proti narušitelskému UAS nechceme, aby došlo k jeho pádu. V případě solární elektrárny by mohlo dojít k poškození citlivého fotovoltaického zařízení. V případě vodní nádrže by hrozilo nebezpečí úniku toxických látek z UAS do zdroje pitné vody.

Podle dat FAA došlo v minulém roce k pozorování UAS, které ohrožovalo provoz, v blízkosti letiště v průměru 250krát za měsíc. Rok předtím to bylo pouze 159. To znamená, že došlo k více než 57% nárůstu. [27] Se zaváděním detekčních systémů lze paradoxně odhadovat, že toto číslo bude nadále stoupat. V současné době jsou do této statistiky zahrnuty převážně UAS, které byly zahlédnuty posádkami přistávajících a odlétávajících letadel. Lze tedy usoudit, že nebyly ani zdaleka zaregistrovány všechny UAS, které narušily vyhrazené prostory letišť. Znamená to, že zvýšení úrovně bezpečnosti letišť může v důsledku vést k jejich frekventovanějšímu uzavírání a následným finančním ztrátám.

5. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout koncept zabezpečení letiště Václava Havla proti UAS. Byly definovány hrozby, které hrozí civilnímu letectví ze strany bezpilotních prostředků. Následně byly porovnány dostupné systémy a vybrány ty, které lze bezpečně použít při ochraně mezinárodního letiště. Při vytváření návrhu jsem se zaměřil na neúmyslná narušení vzdušného prostoru spolu s nepříliš sofistikovanými cílenými útoky.

Výsledný návrh splňuje požadavky definované v předchozí části této práce. Největší důraz byl kladen na včasnou detekci narušitelského UAS daleko za hranicí perimetru letiště. Inspirací pro konkrétní návrh zabezpečení byl průběh incidentu na letišti Gatwick v roce 2018. Velké finanční škody způsobil především fakt, že se narušitelský UAS stále vracel, čímž uzavření letiště prodlužoval. Z toho důvodu byla do našeho návrhu zařazena oktokoptéra Eagle.One, která umožňuje cíl eliminovat.

V rámci práce byl popsán současný legislativní rámec vycházející z Doplňku X. Dále byly popsány legislativní změny, které přinese Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945. Tyto změny by měly zvýšit kvalifikovanost operátorů UAS, ale také zjednodušit pátrání po majiteli v případě, že bezpilotní letadlo způsobí škodu na majetku nebo zdraví osob.

Při zpracovávání návrhu jsem narazil na četná omezení. Například nebylo možné využít plný potenciál systému ApolloShield, jelikož v současné době letecké úřady nepovolují použití vysílačů RF v rámci letiště. Konají tak z obavy, že by docházelo k rušení ostatních zařízení využívajících RF v rámci letiště. Oktokoptéra Eagle.One dokáže operovat plně autonomně. To zahrnuje navigaci a let do blízkosti cíle i následný zákrok proti narušitelskému UAS. Současná legislativa ovšem autonomní provoz UAS v rámci civilního sektoru nepovoluje. Nutnost pilotáže člověkem zvýší čas a sníží celkovou efektivitu zásahu proti UAS. Zákrok proti narušitelskému UAS komplikuje i skutečnost, že podle současné legislativy mohou zákrok provést pouze příslušníci Armády ČR a Policie ČR. Celý proces by urychlilo, kdyby se tato pravomoc rozšířila i na členy ostražky letiště. Ti v současné době již mají na starost ochranu perimetru letiště Václava Havla.

Výsledný návrh byl prezentován přímo na letišti Václava Havla. Navržená koncepce byla shledána jako správná a v reálném provozu proveditelná. Zvláště byla kvitována instalace systému ApolloShield do prostoru prahů vzletových a přistávacích drah. Z pokusů prováděných na letišti Václava Havla totiž vyplývá, že při instalaci senzorů RF v okolí budov, dochází

k poklesu dosahu a celkových výkonů senzorů. Dále testy ukázaly, že v reálném prostředí radary nedosahují tabulkových dosahů uváděných výrobcí.

Do budoucna lze předpokládat, že stoupající počet UAS mezi veřejností bude mít negativní dopad na civilní letectví. V současné době jsou podobné incidenty spíše ojedinělé, nicméně lze pozorovat stoupající trend. Vyšší pozornosti se tomuto problému dostane nejspíše až ve chvíli, kdy dojde k vážnější nehodě, při které dojde k velkým škodám na majetku nebo zdraví osob.

Použité zdroje

- [1] Letiště Václava Havla Praha odbavilo za rok 2019 rekordních 17,8 milionů cestujících | Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. *Letiště Václava Havla Praha / Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/letiste-vaclava-havla-praha-odbavilo-za-rok-2019-rekordnich-178-milionu-cestujicich>
- [2] DUDÁČEK, Lubomír. *Dopravní letiště Prahy: The airports of Prague : 1918-1946*. 2. limitované vyd. Praha: MBI, 2012. ISBN 978-80-86524-16-0.
- [3] DUDÁČEK, Lubomír. *Dopravní letiště Prahy*. Praha: MBI, 2000. ISBN 80-902238-6-9.
- [4] Allan, John R. and Orosz, Alex P., "THE COSTS OF BIRDSTRIKES TO COMMERCIAL AVIATION" (2001). 2001 Bird Strike Committee-USA/Canada, Third Joint Annual Meeting, Calgary, AB. 2. <https://digitalcommons.unl.edu/birdstrike2001/2>
- [5] DRONESHIELD. *DroneShield.com* [online]. [cit. 1.8.2020]. Dostupný na WWW: <https://www.droneshield.com/dronesentry-x>
- [6] DRONESHIELD. *DroneShield.com* [online]. [cit. 1.8.2020]. Dostupný na WWW: <https://www.droneshield.com/dronegun-mkiii>
- [7] Gatwick drone chaos cost the airport £1,400,000 | Metro News. *Metro.co.uk: News, Sport, Showbiz, Celebrities from Metro* [online]. Dostupné z: <https://metro.co.uk/2019/06/18/gatwick-drone-chaos-cost-airport-1400000-10009801/>
- [8] Flights diverted after Gatwick Airport 'drone sighting' - BBC News. *BBC - Homepage* [online]. Copyright © 2020 BBC. [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/uk-england-sussex-48086013>
- [9] Gatwick chaos: Police 'could shoot down drone' - BBC News. *BBC - Homepage* [online]. Copyright © 2020 BBC. [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/uk-england-sussex-46640033>
- [10] Gatwick drone arrests: Sussex Police pays out £200,000 - BBC News. *BBC - Homepage* [online]. Copyright © 2020 BBC. [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/uk-england-sussex-53041256>
- [11] Satellite photos show extent of damage to Saudi Aramco plants. [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.cnbc.com/2019/09/17/satellite-photos-show-extent-of-damage-to-saudi-aramco-plants.html>

- [12] Multi-robot Systems - MBZIRC-2017. *Multi-robot Systems* [online]. Copyright © 2020 Multi [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <http://mrs.felk.cvut.cz/mbzirc>
- [13] *EAGLE.ONE / The first truly autonomous anti-drone solution* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: https://eagle.one/downloads/eagle_one_press_kit.pdf?v2
- [14] *Sensor Solutions / HENSOLDT* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: https://www.hensoldt.net/fileadmin/HENSOLDT_2019/Products/Radar_IFF_Datalink/SPEXER_2000_2_D_E_270519_low_res.pdf
- [15] *Sensor Solutions / HENSOLDT* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: https://www.hensoldt.net/fileadmin/HENSOLDT_2019/Products/Radar_IFF_Datalink/Spexer_500_27052019_low_res.pdf []
- [16] *AIM / Air Navigation Services of the CR* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [17] EUR-Lex - 32019R0945 - EN - EUR-Lex. *EUR-Lex — Access to European Union law* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32019R0945>
- [18] *Sensor Solutions / HENSOLDT* [online]. Copyright © [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: https://www.hensoldt.net/fileadmin/HENSOLDT_2019/Products/Radar_IFF_Datalink/SPEXER_360_29052019_low_res.pdf
- [19] Air Force Set To Deploy Its Counter-Drone "Phaser" Microwave Weapon Overseas | Car in My Life. *Car News, Automotive Trends, and New Model Announcements / Car in My Life* [online]. Copyright © 2020 [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://carinmylife.com/news-features/air-force-set-to-deploy-its-counter-drone-phaser-microwave-weapon-overseas/>
- [20] Věk laserových zbraní se blíží | ArmadniNoviny.cz. *ARMÁDNÍ NOVINY | Nejčtenější český vojenský web | ArmadniNoviny.cz* [online]. Copyright © 2018 Armadninoviny.cz [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/vek-laserovych-zbrani-se-blizi.html>
- [21] Station de la Chain Home (GB -1939). | Download Scientific Diagram. *ResearchGate / Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Station-de-la-Chain-Home-GB-1939_fig3_334608598
- [22] A Dutch company is training birds to take down drones - Marketplace. *Marketplace - Business News & Economic Stories For Everyone.* [online]. Copyright

© 2020 Minnesota Public Radio. All Rights Reserved. Marketplace is a division of MPR [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.marketplace.org/2016/05/30/dutch-company-training-birds-take-down-drones/>

[23] Eagle.One – české zařízení odhalí a zpacifikuje nebezpečný dron - Světchytře.cz. *Světchytře.cz - Píšeme o technologiích, které lidem usnadňují život.* [online].

Copyright © 2018 SocialBooster s.r.o. [cit. 01.08.2020]. Dostupné z: <https://www.svetchytře.cz/a/pTggy/eagleone--ceske-zarizeni-odhali-a-zpacifikuje-nebezpecny-dron>

[24] Laser classification table - Laser Safety Facts. *Home - Laser Safety Facts* [online]. Dostupné z: <https://www.lasersafetyfacts.com/laserclasses.html>

[25] Nichols, Randall K.; Mumm, Hans C.; Lonstein, Wayne D.; Ryan, Julie J.C.H; Carter, Candice; and Hood, John-Paul, "Counter Unmanned Aircraft Systems Technologies and Operations" (2020). NPP eBooks . 31. <https://newprairiepress.org/ebooks/31>

[26] Dron narušil provoz na Ruzyni. *Droneweb* [online]. Copyright ©Droneweb.cz 2015 [cit. 02.08.2020]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/aktuality/item/56-dron-prerusil-provoz-na-ruzyni>

[27] ASSUREuas - Research Projects - sUAS Airborne Collision Report. *ASSUREuas* [online]. Dostupné z: <https://www.assureuas.org/projects/deliverables/sUASAirborneCollisionReport.php>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Satelitní snímek letiště Václava Havla	10
Obrázek 2: Stav RWY v roce 1945 [2]	12
Obrázek 3: Systém Drone Sentry-X od společnosti DroneShield [5]	16
Obrázek 4: Antény radarů Chain Home [21]	21
Obrázek 5: Systém AN/SEG-3 [20]	25
Obrázek 6: Systém PHASER od společnosti Raytheon [19]	27
Obrázek 7: orel z projektu Guard From Above [22]	29
Obrázek 8: Oktokoptéra Eagle.One [23]	34
Obrázek 9: Radary Spexer 500 a Spexer 2000 [14] [15]	36
Obrázek 10: Koncepce ApolloShield	38
Obrázek 11: Koncepce RF senzorů XPeller	39
Obrázek 12: Koncepce radarů Spexer	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení UAS v otevřené oblasti	31
Tabulka 2: Modely radaru Spexer	36