



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

# **TCAS jako prostředek ke zvýšení bezpečnosti letového provozu**

**TCAS as a way to improve air traffic safety**

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích  
Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Petr Mrázek Ph.D.

**Martin Pešout**

2017 Praha



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Martin Pešout**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **TCAS jako prostředek ke zvýšení bezpečnosti letového provozu**

Název tématu (anglicky): TCAS as a Way to Improve Air Traffic Safety

**Zásady pro vypracování**

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

- Události předcházející vzniku protisrážkových systémů
- Palubní protisrážkové systémy
- Aktuální stav problematiky
- Možnosti vývoje systému
- Předpoklad zavedení nových systémů do praxe



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: [www.easa.europa.eu](http://www.easa.europa.eu)  
[www.eurocontrol.int](http://www.eurocontrol.int)  
[www.aerospace.honeywell.com](http://www.aerospace.honeywell.com)

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Mrázek, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**  
(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: **30. května 2017**  
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. Stanislav Szabo, PhD. MBA  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



.....  
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

.....  
Bc. Martin Pešout  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....30. června 2016

## Poděkování


Za odborné vedení, rady a konzultování diplomové práce bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Mrázkovi, Ph.D.

## Prohlášení

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 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).

V Praze dne 28. 5. 2017



.....  
podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

TCAS jako prostředek ke zvýšení bezpečnosti letového provozu

diplomová práce

Martin Pešout

## **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je analyzovat problematiku protisrážkového systému a jeho vlivu na bezpečnost letového provozu, definovat aktuální nedostatky tohoto systému a navrhnout řešení vedoucí k zlepšení situace.

## **Abstract**

Subject of this dissertation is to analyze problematics of collision avoidance system and its effect on air traffic safety, to define current deficits of this system and design a solution towards situation improvement.

## **Klíčová slova**

ACAS, TCAS, palubní protisrážkový systém, bezpečnost letového provozu, rada k vyhnutí, Eurocontrol

## **Keywords**

ACAS, TCAS, airborne collision avoidance system, air traffic safety, resolution advisory, Eurocontrol

## Obsah

Poděkování.....	4
Prohlášení .....	4
1. Úvod.....	8
2. Události předcházející vzniku protisrážkových systémů .....	9
3. Palubní protisrážkové systémy.....	16
3.1. Protisrážkový systém TCAS .....	16
3.1.1. Odpovídače módu A .....	16
3.1.2. Odpovídače módu A/C.....	16
3.1.3. Odpovídače módu S .....	17
3.1.4. Logika vyhnutí se srážce .....	18
3.2. Vybavení odpovídačem.....	26
3.2.1. Odpovídač v módu A s hlášením tlakové výšky v módu C.....	27
3.2.2. Odpovídač v módu S s funkčností Elementary Surveillance.....	27
3.2.3. Odpovídač v módu S s funkčností Enhanced Surveillance.....	28
3.2.4. Výjimky .....	28
3.3. Jednotlivé typy TCAS .....	29
3.3.1. TCAS I .....	29
3.3.2. TCAS II .....	30
3.3.3. TCAS III .....	41
3.3.4. TCAS IV.....	42
4. Aktuální stav problematiky.....	43
4.1. Zobrazení výstupu posádky .....	44
4.2. Omezení sledování cílů .....	49
4.3. Funkce hybridního sledování.....	50
4.4. TCAS II a jeho omezení .....	51
4.5. Vliv na bezpečnost .....	52

4.5.1. Výskyt manuálně oznamované rady k vyhnutí .....	53
4.5.2. Výskyt automaticky oznámené rady k vyhnutí .....	58
4.5.3. Rady k vyhnutí v ČR .....	62
4.6. Výcvik posádek k obsluze protisrážkového systému .....	63
5. Možnosti vývoje systému.....	65
5.1. Úhybný manévr provedený autopilotem .....	65
5.2. Automatické snížení vertikální rychlosti.....	68
6. Předpoklad zavedení nových systémů do praxe .....	70
7. Závěr .....	72
Seznam použitých zdrojů:.....	74
Seznam obrázků:.....	76
Seznam tabulek:.....	77
Seznam použitých grafů: .....	78

# **1. Úvod**

V této diplomové práci se budu věnovat problematice protisrážkového systému TCAS, jeho vlivu na bezpečnost letového provozu a možnostem případného vylepšení. V práci popíši události vedoucí k požadavku na vybavení letadel protisrážkovými systémy a jejich následnému vývoji s popisem jednotlivých typů tohoto systému, včetně legislativních ustanovení. Popíši princip činnosti protisrážkového systému TCAS, použitou logiku vyhýbání a porovnáím předchozí verzi zařízení se současnou včetně nových funkcí, které nová verze přinesla. Definuji zjištěné nedostatky, jimiž je tento systém z objektivního či subjektivního hlediska zatížen. Vyhodnotím dostupné statistiky týkající se rad k vyhnutí vydávaných protisrážkovými systémy v evropském regionu také s ohledem na možný rozpor mezi generovanými radami a postupy posádek.

Cílem této diplomové práce je navržení určitých prostředků, jimiž budu reagovat na nedostatky vlastními návrhy, které v reálném provozu povedou ke zvýšení efektivity při vydávání rad k vyhnutí, snížení frekvence případných nežádoucích rad k vyhnutí a tím ve svém důsledku ke zvýšení důvěry pilotů ve správnost generovaných rad k vyhnutí protisrážkovými systémy.



## **2. Události předcházející vzniku protisrážkových systémů**

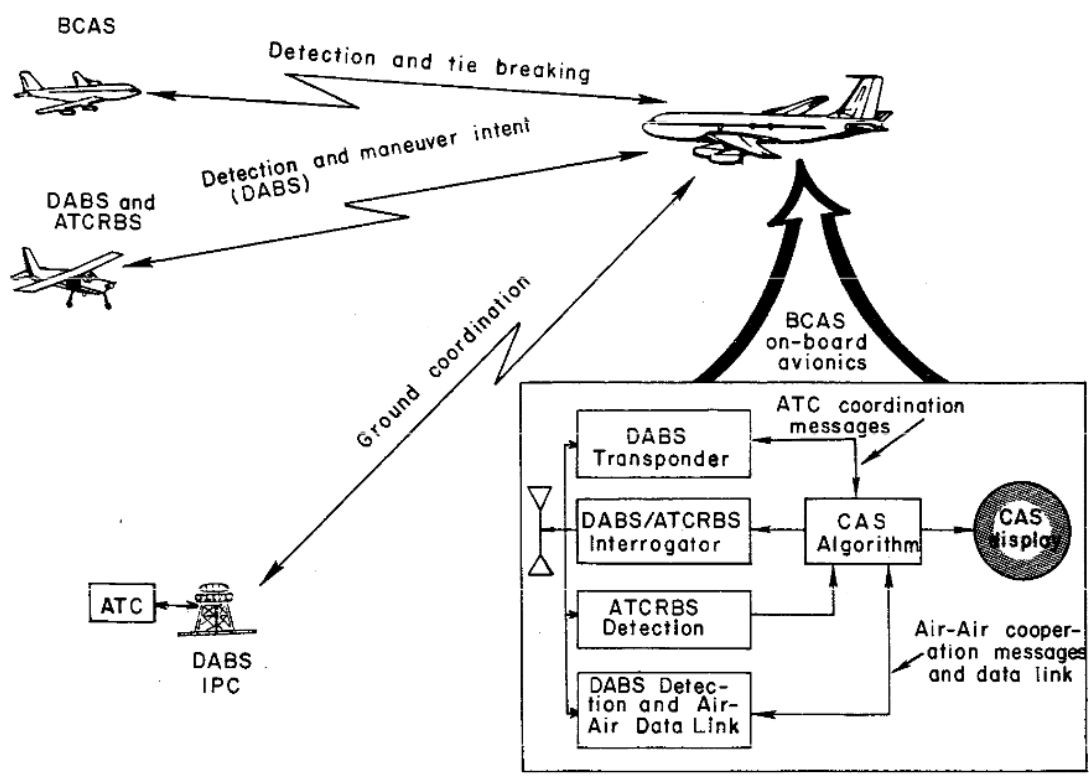
Impulzem k zahájení studie o protisrážkovém systému byla letecká nehoda v červnu roku 1956. Při té došlo ke srážce letounů DC-7 společnosti United Airlines a Lockheed L-1049 Super Constellation společnosti Trans World Airlines nad oblastí Grand Canyon, kde oba letouny prolétaly neřízeným prostorem a nacházely se ve stejné výšce (21 000ft). Ke kolizi došlo poté, co se při vzájemném úhlu zhruba 25 stupňů oba letouny pravděpodobně vyhýbaly stejnému věžovitému kumulu (cumulus castellanus). Z vyšetřování nehody vyplynul závěr, že v době kolize byl letoun DC-7 v pravém náklonu a v klopení ve smyslu „těžký na hlavu“, z čehož vyšetřovatelé usuzovali, že posádka DC-7 spatřila konfliktní provoz na poslední chvíli a snažila se úhybným manévrem změnit trajektorii letu na nekonfliktní směr. Se svými 128 oběťmi byla tato nehoda klasifikována jako první v civilní obchodní letecké dopravě s počtem obětí nad 100.

V prosinci roku 1960 došlo k další srážce dvou dopravních letounů nad městem New York. Posádka letounu Douglas DC-8 společnosti United Airlines letící na letiště Idlewild (od roku 1963 pojmenováno jako mezinárodní letiště John F. Kennedyho) byla povolena pro vstup do vyčkávacího obrazce ve výšce 5000ft a maximální rychlostí 210kts, ale vstup do obrazce nezačala. Pokračovala neměnným směrem a srazila se s letounem Lockheed L-1049 Super Constellation společnosti TWA, který vykonával let na letiště LaGuardia.

Na přelomu šedesátých a sedmdesátých let vyvinulo několik technologických společností prototypy jedněch z prvních protisrážkových systémů. Během následného testovacího období těchto systémů se došlo k závěru, že i přes uspokojivé výsledky získané simulovanými sblíženími letadel nebude žádný z těchto systémů uveden do reálného provozu. Důvodem byl předpoklad, že by protisrážkové systémy instalované v dopravních letadlech generovaly příliš velké množství falešných varování při letech v blízkosti letišť s hustým provozem. Tato skutečnost by mohla způsobit výrazné snížení důvěry posádek v tyto systémy.

Dr. John S. Morrel přišel s myšlenkou využití šikmé vzdálenosti dvou letadel vydělené rychlostí sblížení, tedy využití času k dosažení nejbližšího bodu sblížení oproti využití vzdálenosti. Tato metoda zůstala zachována i v dnešních verzích protisrážkového systému.

Roku 1974 byl zahájen vývoj systému BCAS (Beacon Collision Avoidance System), který využíval pouze vzdálenost subjektů a jejich výšku, nebral v potaz vzájemný směr. Vzdálenost a výška byla získána díky tehdejším odpovídačům – ATCRBS (Air Traffic Control Radar Beacon System) nebo novější DABS (Discrete Address Beacon System).



BCAS schéma (Active Beacon Collision Avoidance System (BCAS) Functional Overview, Lincoln LAB) – obr. 1

V roce 1978 následovala další srážka dvou letounů mezi Boeingem B-727 společnosti Pacific Southwest Airlines a Cessnou C-172 nad San Diegem v Kalifornii, kdy byla posádka upozorněna na C-172 a instruována, aby dodržela separaci vizuálně. Posádka nejprve druhý letoun viděla, ovšem krátce na to ztratila vizuální kontakt a i přesto pokračovala v přiblížení na letiště San Diego.

Ve všech případech zde uvedených nehod nebyla letadla vybavena žádnou technikou zajišťující protisrážkové charakteristiky ani žádným vybavením, sloužícím k upozornění na případný konfliktní provoz. V době před zprovozněním protisrážkových systémů na palubách dopravních letadel využívaly posádky pouze vizuální referenci pohledem z kokpitu jako prevenci sblížení či srážky. To lze pohledem na výčet srážek letadel považovat za nespolehlivou a nedostatečnou metodu.

Následně zahájila americká FAA vývoj protisrážkového systému s označením ACAS, který převzal základy návrhu systému BCAS pro dotazování a sledování jiných zařízení. Zkratka ACAS se skládá z počátečních písmen – Airborne Collision Avoidance System.

V roce 1986 došlo k další srážce za letu DC-9 a Piper Archer nad městem Cerritos ve státě Kalifornie. Protisrážkový systém na palubách nebyl instalován, jelikož byl stále ve vývoji. Po této nehodě přednesl americký Kongres zákon, který udává FAA povinnost vyžadovat po provozovatelích instalaci ACAS na palubách letounů, provozovaných ve vzdušném prostoru Spojených států amerických.

Během osmdesátých let probíhalo vyhodnocování první verze TCAS II. V září roku 1989 byl dokončen návrh verze 6.02 a od dubna roku 1990 byl uveden do běžného provozu. Od konce prosince roku 1993 vnikla povinnost pro všechny letouny s proudovými motory, schopné přepravy více než 30 cestujících a vykonávající let ve vzdušném prostoru Spojených států amerických mít na palubě TCAS II. Letouny s 10 – 30 sedadly byly vybaveny TCASem I. TCAS I poskytuje jen upozornění na provoz (traffic advisory), zatímco TCAS II poskytuje navíc rady k vyhnutí (resolution advisory).

Během devadesátých let zadala mezinárodní organizace ICAO (International Civil Aviation Organization) globální vyhodnocování přínosu protisrážkového systému v provozu. Na základě skutečností vyplývajících z tohoto průzkumu bylo doporučeno implementování některých funkcí, které nebyly dostupné v provedení verze 6.02. Po následném vývoji dochází v roce 1993 k distribuci verze 6.04a, jež snižuje

pravděpodobnost výskytu falešných varování, které se statisticky vyskytovaly v malých výškách a při přechodu do horizontálního letu.

V roce 1995 byl v Evropě přijat následující plán podmínek:

- od 1. ledna 2000 všechny letouny s proudovými motory, které mají maximální vzletovou hmotnost více než 15000kg nebo mají maximální povolené množství přepravovaných cestujících více než 30, musejí být vybaveny ACASem II a
- od 1. ledna 2005 všechny letouny s proudovými motory, které mají maximální vzletovou hmotnost více než 5700kg nebo mají maximální povolené množství přepravovaných cestujících více než 19, musejí být vybaveny ACASem II.

Srážka za letu mezi B-747 a IL-76 v roce 1996 nad Novým Dillí v Indii vedla k zavedení požadavku na vybavenost TCASem v ostatních částech světa, nejen USA. ICAO v rámci zajištění efektivity ACASu II zavedla mezinárodní požadavek na vybavení letounu tímto systémem po celém světě a také vyžadovala mít na palubách letounů odpovídače, které jsou schopné detekování a oznamování tlakové výšky. Ta je jednou z několika základních veličin potřebných pro vygenerování rady k vyhnutí – Resolution Advisory (RA).

Průběžně se vyhodnocovala provozní funkčnost protisrážkového systému a zjištěné nedostatky byly upraveny a zapracovány spolu s dalšími vylepšeními do následující verze 7.0. Tato verze byla v prosinci roku 1997 schválena a od počátku roku 1999 byla dostupná pro provozovatele.

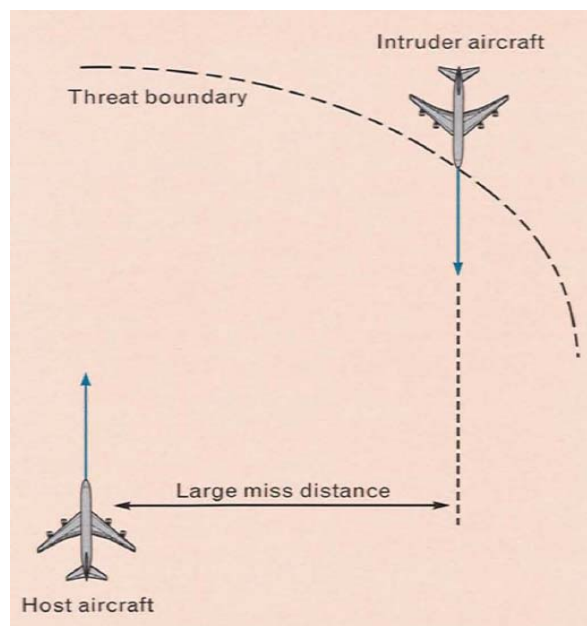
Verze 7.0 zlepšovala kompatibilitu se systémy složek řízení letového provozu, zavedla například následující nové prvky:

- horizontal miss distance filter (viz níže)
- vyhodnocování výšky v krocích po 25 stopách namísto předchozího krokování po 100 stopách
- multi-threat logic (viz níže)
- kompatibilitu s prostorem RVSM (reduced vertical separation minima)
- snížení nežádoucího elektromagnetického rušení



- možnost generování opravných rad k vyhnutí (v případě koordinace mezi palubními protisrážkovými systémy)
- zjednodušené akustické pokyny a upozornění.

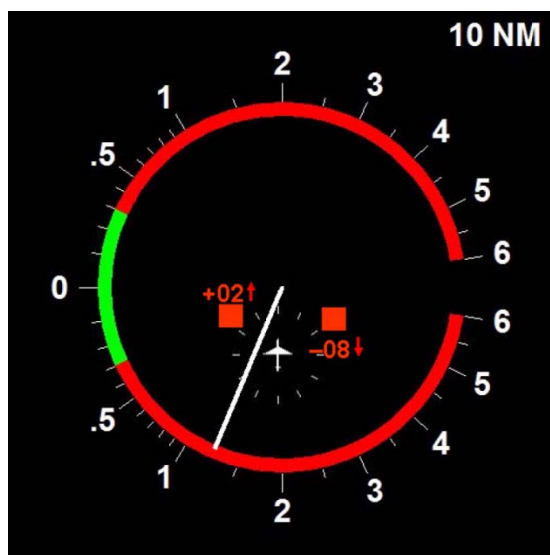
Horizontal miss distance filter zajišťuje vyhodnocování detekovaného provozu v horizontální rovině v bodě největšího sblížení. Pokud se letoun míjí s jiným letounem vstřícným kurzem v určité horizontální vzdálenosti, tento filtr zajistí, že nebude vydána rada k vyhnutí a letouny se tak minou v dostatečné vzdálenosti bez změny trajektorie. V předcházejících verzích TCASu absence tohoto filtru mohla způsobit skutečné sblížení letadel, pokud protisrážkový systém vydal radu k vyhnutí i za předpokladu dostatečné horizontální vzdálenosti (viz obrázek níže). Posádky by tak následovaly radu k vyhnutí a tímto manévrem by se mohly sblížit s dalším letounem, který původně nevytvářel potenciálního narušitele (tzv. TCAS-induced collision).



Horizontal miss distance filter (TCAS: Maneuvering Aircraft in the Horizontal Plane, Douglas W. Burgess) – obr. 2

Multi-threat logic je schopnost protisrážkového systému vyhodnotit vícero konfliktních letounů v jeden časový okamžik a vydat tak radu k vyhnutí zajišťující dostatečný rozstup od více narušitelů. Rada k vyhnutí v takovém případě může zajistit buďto přelet nad nebo pod veškerým konfliktním provozem, což zajistí dostatečnou vzdálenost mezi letouny, nebo může být vydána rada k vyhnutí zajišťující průlet mezi konfliktním provozem – tedy jeden potenciální narušitel se bude nacházet nad

trajektorií letounu a druhý pod ní. Tuto situaci zobrazuje ilustrace pod textem, kde by ve verzi 7.0 protisrážkového systému byla taková rada k vyhnutí doprovázena akustickým pokynem „adjust vertical speed, adjust“ a v současné verzi 7.1 pokynem „Level off, level off“.



TCAS RA pro více narušitelů (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 3

Vznik nastupující verze 7.1 byl iniciován společností Eurocontrol po zjištění dvou bezpečnostních nedostatků předchozí verze. Vývoj probíhal za vzájemné spolupráce RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) ve Spojených státech a EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment) v Evropě s přispěním několika dalších organizací zahrnující letecké společnosti a poskytovatele navigačních služeb.

V roce 2010 bylo změnou č. 85 svazku IV, dodatku 10 k Chicagské úmluvě (Annex 10/IV) uvedeno ustanovení vyžadující verzi 7.1 ve všech nových instalacích po lednu 2014 a ve všech letadlech (včetně již vyrobených) od ledna 2017.

Evropská komise vydala v prosinci 2011 nařízení č. 1332/2011, později pozměněno nařízením č. 2016/583, které udává provozovatelům povinnost ve vzdušném prostoru zemí Evropské unie vybavit své letouny protisrážkovým systémem verze 7.1 v datech dřívějších, než vyžadoval dodatek 10 k Chicagské úmluvě. Komise vyžadovala provedení této instalace do prosince roku 2015 pro letouny vybavené dřívější

verzí 7.0 a pro nové letouny (s maximální vzletovou hmotností vyšší než 5700 kg nebo maximální sedadlovou kapacitou větší než 19) již do března 2012. Letouny, které nespádají do výše uvedené specifikace a jejich provozovatelé je chtějí vybavit na bázi dobrovolnosti protisrážkovým systémem ACAS II, musejí být vybaveny v souladu s verzí 7.1.

Pro vojenské letouny tyto požadavky neplatí, přesto se armády členských zemí ECAC (European Civil Aviation Conference) vzájemně shodly na programu dobrovolné instalace ACAS II na palubách státních nebojových dopravních letadel. V Německu je vybavení a provoz ACASu II vyžadováno jako povinné pro veškerý dopravní vojenský provoz (AIC IFR 8 – 23 Dec 2004).

I přes výše uvedenou povinnost mít na palubě zařízení TCAS může být let vykonán bez provozuschopného zařízení. V případě jeho poruchy lze provést let v souladu se seznamem minimálního vybavení MEL (minimum equipment list). To je seznam uvádějící všechna palubní zařízení, která mohou být po určitou dobu mimo provoz. Požadavky na dobu neprovozuschopnosti se mohou mezi jednotlivými leteckými společnostmi lišit, ale podle Eurocontrolu většina společností v Evropě vyžaduje zprovoznění protisrážkového systému do 10 dní. Lze ilustrovat na nejmenované renomované letecké společnosti umožňující vykonat let pro svou flotilu letounů Boeing B777 za podmínky, že letoun nesmí odletět z letiště, kde je rozumně proveditelné vykonat opravu nebo výměnu zařízení. Doba neprovozuschopnosti je zde uvedena na nejdéle 10 dní a poslední podmínkou je nutná provozuschopnost protisrážkového systému při odletu z domovského letiště této letecké společnosti, které se nachází mimo Evropu.

Složky řízení letového provozu zajišťují bezpečné rozstupy pro letadla v jejich vzdušném prostoru odpovědnosti a i přes současnou technologickou vyspělost systémů sloužících řídicím letového provozu dochází občasné ke snížení minimálních rozstupů mezi letadly. Příčinou může být lidská chyba nebo technické selhání některého z mnoha systémů zahrnutých v procesu řízení letového provozu. Každé takové snížení rozstupů zvyšuje riziko srážky, a proto se na paluby letadel instalují protisrážkové systémy jakožto poslední prostředek schopný zabránit srážce za letu.

## **3. Palubní protisrážkové systémy**

### **3.1. Protisrážkový systém TCAS**

Protisrážkový systém TCAS se rozděluje na několik typů podle funkcí, které jsou u daného typu dostupné. Všechny současné systémy pracují automaticky bez nutnosti zásahu posádky a jsou nezávislé na palubních navigačních zařízeních a na jakýchkoliv pozemních navigačních systémech. Použití protisrážkového systému je definováno v Annexu 6, Doc. 8168 a Doc. 4444. Podle české implementace předpisu Doc. 8168 – předpisu L-8168 (Provoz letadel – letové postupy) ohledně postupů při vygenerování rady k vyhnutí (RA) například pilot nemusí postupovat podle rady k vyhnutí, pokud by tím ohrozil bezpečnost letadla. Pokud řídící letového provozu vydá opačný pokyn než TCAS, musí posádka postupovat podle RA. Dále tento předpis zmiňuje doporučení na postupy používané při stoupání nebo klesání. Posádkám je doporučováno, aby v posledních 1000ft (300m) při stoupání nebo klesání do přidělené hladiny snížily svou vertikální rychlost na hodnotu nižší než 1500ft/min (8 m/s). Tento požadavek se vztahuje pouze na konkrétní situaci, tedy pokud si je posádka vědoma jiného letadla v blízké nadmořské výšce. Doporučení ke snížení vertikální rychlosti je odůvodněné snahou pro snížení pravděpodobnosti, že protisrážkové systémy tyto letadla vyhodnotí jako konfliktní a vydají radu k vyhnutí. Letecké společnosti by měly tento postup uvést jako doporučení pro své posádky a většinou doporučují snížení vertikální rychlosti na hodnotu 1000ft/min.

Zařízení TCAS pracuje na principu dotazování odpovídačů v módu A, C a v módu S. Níže následuje rozdělení odpovídačů podle módů, včetně popisu principu jejich činnosti.

#### **3.1.1. Odpovídače módu A**

Odpovídače, které jsou schopny vysílat pouze v módu A, nejsou protisrážkovým systémem detekovatelné, jelikož protisrážkový systém TCAS nevysílá své dotazy v módu A.

#### **3.1.2. Odpovídače módu A/C**

Protisrážkový systém TCAS může detekovat a sledovat odpovídače vysílající v módu A/C. TCAS vyhodnotí přijatá data z těchto detekovaných zdrojů (vzdálenost,



směr, výšku) a zobrazí na palubních zobrazovacích zařízeních pro zvýšení situačního povědomí posádky. Odpovídač vysílá svou změřenou výšku v krocích po 100ft. Následně tato data využívá pro případné vygenerování upozornění na provoz nebo rady k vyhnutí. Při vygenerování rady k vyhnutí není možné provést koordinaci mezi jednotlivými protisrážkovými systémy v módu A/C.

Pokud tento odpovídač přestane vysílat svou výšku (mód C), je jeho poloha stále detekovatelná a zůstane i nadále její zobrazení k dispozici pro posádku, pokud se vlastní letoun vybavený TCASem nachází pod letovou hladinou 155 (15500ft). Pro tohoto narušitele bez hlášené výšky může být vygenerována zpráva upozornění na provoz. V důsledku chybějící hlášené výšky není pro TCAS proveditelné generování rady k vyhnutí.

### **3.1.3. Odpovídače módu S**

Odpovídač módu S je pokročilejší než oba předchozí typy a poskytuje o mnoho víc údajů. Princip je založen na tzv. selektivním dotazování, kdy TCAS komunikuje adresně s odpovídači díky jejich unikátní 24 bitové adrese. Odpovídač vysílá v pravidelných intervalech signál (jedenkrát za sekundu), který mimo jiné obsahuje unikátní adresu, a pokud TCAS toto vysílání zachytí, zahájí adresní komunikaci s tímto odpovídačem pomocí jeho adresy. Přestože 24 bitová adresa má být unikátní, existuje podle Eurocontrolu několik hlášených situací, kdy měl odpovídač zaregistrovanou špatnou adresu. Pokud k takové situaci dojde nebo se vyskytnou dva odpovídače s identickou adresou, TCAS bude signál ignorovat.

Pokud odpovídač módu S přeruší oznamování své výšky, kterou za standardních podmínek ohlašuje v krocích po 25 ft, je jeho poloha stále detekovatelná a zůstane i nadále její zobrazení k dispozici pro posádku. Pro TA či RA platí stejné podmínky jako u odpovídače módu C výše.

Existují dva možné typy odpovídače módu S. První typ má schopnost Elementary Surveillance (ELS) a druhý typ Enhanced Surveillance (EHS). Základním rozdílem mezi nimi jsou data, která vysílají.

Odpovídač se schopností **Elementary Surveillance** musí být schopen vysílat následující hodnoty:

- vlastní 24 bitovou adresu
- identifikaci letadla (volací znak letu nebo registrace letadla)
- výšku letadla v krocích po 25ft
- nastavený kód odpovídače
- status letu (zda je letadlo v letu, nebo na zemi)
- hlášení kapacity datové spoje (slouží pozemním systémům k identifikaci datových kapacit odpovídače)
- informaci o generování rady k vyhnutí (RA).

Odpovídač se schopností **Enhanced Surveillance** musí být schopen vysílat stejné parametry jako odpovídač se schopností Elementary Surveillance uvedené výše a k tomu musí navíc být schopen vysílat následující hodnoty, nazvané Downlink Aircraft Parameters (DAPs):

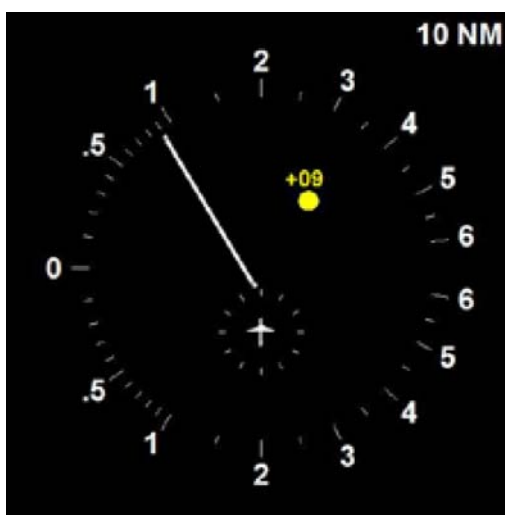
- posádkou zvolenou výšku letu na panelu autopilota
- úhel náklonu, úhlovou rychlost točení, zeměpisný traťový úhel, magnetický kurz
- rychlost vůči zemi
- indikovaná rychlost/Machovo číslo
- vertikální rychlost.

Vzhledem k tomu, že oba typy odpovídačů módu S jsou schopny vysílat informaci o vygenerování rady k vyhnutí, je o této skutečnosti řídicí letového provozu informován bez prodlení a nemusí čekat na informaci od posádky. Podmínkou k přijetí této informace je radarové vybavení schopné přijímat vysílání odpovídače módu S.

#### **3.1.4. Logika vyhnutí se srážce**

Z odpovědí přijatých od odpovídačů v dosahu letounu vyhodnotí palubní systém TCAS relativní polohu a výšku, vypočte, zda dojde ke sblížení, či nikoliv a tyto informace zprostředkuje posádce zobrazením na palubním zobrazovacím zařízení nebo akusticky pomocí syntetického hlasu. Protisrážkový systém je schopen vygenerovat dva druhy upozornění:

**1) Upozornění na provoz (TA – traffic advisory)** – upozornění na potenciální konfliktní provoz. Tento potenciální narušitel v momentě generování zprávy nevytváří přímo nebezpečí srážky, pouze zde existuje pravděpodobnost, že bude následovat generování rady k vyhnutí, kdy nepostupování podle této rady může vést ke sblížení nebo srážce. Pro posádky znamená tato zpráva pokyn k vizuálnímu vyhledávání tohoto letounu pohledem z kabiny ven (pokud to meteorologické podmínky dovolují). Jako poradní informaci pro směr a vzdálenost hledání lze využít zobrazení protisrážkového systému, který posádku informuje o relativní poloze a výšce narušitele. Toto upozornění je zpravidla vygenerováno 20 – 48 sekund před dosažením bodu největšího sblížení nebo 10 – 13 sekund před vygenerováním rady k vyhnutí. V hodnotách vertikálního rozstupu je toto upozornění generováno 850 ft pod a nad narušitelem pod letovou hladinu 420 a při rozstupu 1200 ft ve výšce vyšší než hladina 420. Podle Eurocontrolu většina výskytů těchto upozornění není následována radou k vyhnutí. Příklad zobrazení na palubním zobrazovacím zařízení je uveden níže. Provoz s potenciálem vytvoření rizika srážky je vyobrazen žlutým kolečkem s indikátorem relativní výšky (může být k dispozici také trend ukazatel – šipka indikující, zda letoun klesá nebo stoupá), pokud narušitel informaci o výšce nevysílá, je zde vyobrazeno pouze žluté kolečko. Zobrazení je doprovázeno akustickým upozorněním: „traffic, traffic“.

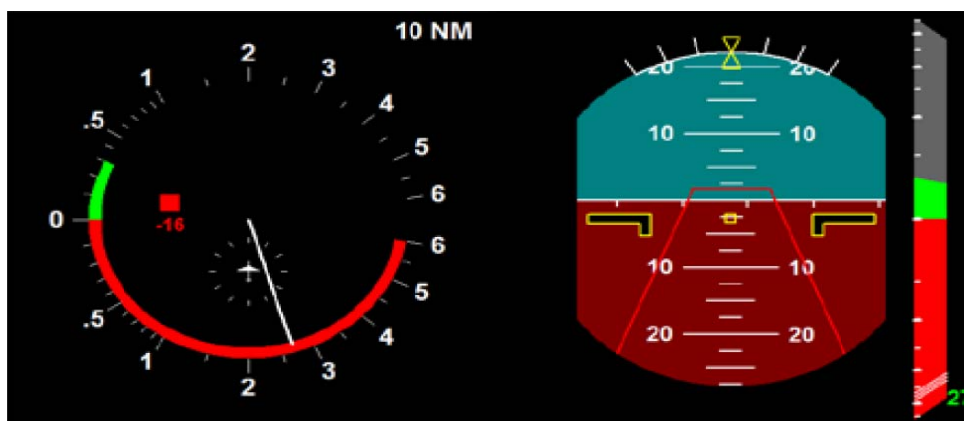


Upozornění na provoz – TA (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 4

**2) Rada k vyhnutí (RA – resolution advisory)** – indikuje směr, jakým má být proveden úhybný manévr, případně jakým směrem nemá být proveden úhybný manévr, aby se rozstup mezi letouny ještě nesnížil. K prezentování rady dochází

zpravidla 15 – 35 sekund před bodem největšího sblížení, ovšem s ohledem na dané sblížení může být zpráva generována i v kratším časovém předstihu. Tyto pokyny zajistí, že se rozstup od narušitele zachová minimálně stejný jako v momentě vygenerování rady k vyhnutí nebo se rozstup zvětší, s ohledem na letovou výšku TCAS zajišťuje vertikální rozstup 300ft – 700ft. Pokud jsou oba letouny vybaveny odpovídáčem módu S, dojde ke koordinaci jednotlivých rad k vyhnutí, v opačném případě může dojít k situaci, kdy oba TCASy vygenerují radu k vyhnutí se stejným smyslem manévru a místo zabránění srážce je její pravděpodobnost ještě zvýšena. Pokud je rada k vyhnutí na palubě letounu vygenerována během provádění zatáčky, která znemožňuje dosažení požadované vertikální rychlosti, měla by posádka převést letoun do přímého letu tak, aby bylo možné postupovat v souladu s radou k vyhnutí. Během provádění úhybného manévru podle rady k vyhnutí není posádka povinna postupovat podle instrukcí řídicího letového provozu. Dokument Doc. 9863 (ICAO ACAS manual) doporučuje, aby posádka postupovala v souladu s instrukcemi řídicího letového provozu (například nalétla směrník od určitého radionavigačního zařízení), ale zároveň postupovala podle generované rady k vyhnutí.

Podle publikace ACAS Guide musí posádka reagovat na první generovanou radu k vyhnutí do 5 sekund a na každou následnou radu k vyhnutí do 2,5 sekundy. Vyžadované vertikální zrychlení je 0,25g pro všechny rady k vyhnutí kromě následné a reverzní rady vyžadující zrychlení 0,35g. Zobrazenou vertikální rychlost je nutné dodržet co nejlépe, neboť v opačném případě nemusí být zajištěn dostatečný vertikální rozstup (v případě dosažení malé vertikální rychlosti) nebo může dojít ke sblížení s jiným, původně nezúčastněným letounem (v případě příliš vysoké vertikální rychlosti).



Rada k vyhnutí – RA (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 5



Výše je uveden příklad zobrazení rady k vyhnutí na palubním zobrazovacím zařízení. Narušitel je vyobrazen symbolem vybarveného červeného čtverce, indikace relativní výšky je stejná jako v předchozím případě. Ze zobrazení je patrné, že byla vydána rada s pokynem pro přechod do horizontálního letu, a správným postupem by v této situaci bylo zvýšení podélného sklonu letounu pro jeho převedení do horizontálního letu. Akustické upozornění pro posádku TCASem ve verzi 7.0 je: „Adjust vertical speed, adjust“, zatímco v novější verzi 7.1 zní upozornění: „Level off, level off“.

Pokud vydá řídicí letového provozu pokyn protichůdný k pokynu protisrážkového systému, musí posádka postupovat podle rady k vyhnutí a informovat opět pozemní stanici o následování rady protisrážkového systému. Podle předpisu Doc. 4444 má posádka použít frázi „UNABLE, TCAS RA“ pokud obdrží protichůdný pokyn od řídicího letového provozu, a frázi „TCAS RA“, pokud postupuje standardně podle rady k vyhnutí, načež od řídicího letového provozu obdrží zprávu „ROGER“. Od tohoto momentu potvrzení není řídicí letového provozu zodpovědný za dodržení vyžadovaného rozstupu a neměl by vydávat tomuto letadlu jakékoliv pokyny ve snaze zabránit sblížení. Poté, co je rada k vyhnutí ukončena, informuje posádka pozemní stanici frází „CLEAR OF CONFLICT“ s dovětkem, že opravují trajektorii letu podle posledního povolení nebo ji již opravili. Řídicí letového provozu po potvrzení této zprávy opět přebírá odpovědnost za dodržení rozstupů daného letadla.

Logika generování rady k vyhnutí spočívá ve vyhodnocení dvou faktorů: úroveň citlivosti (sensitivity level) a čas varování (warning time).

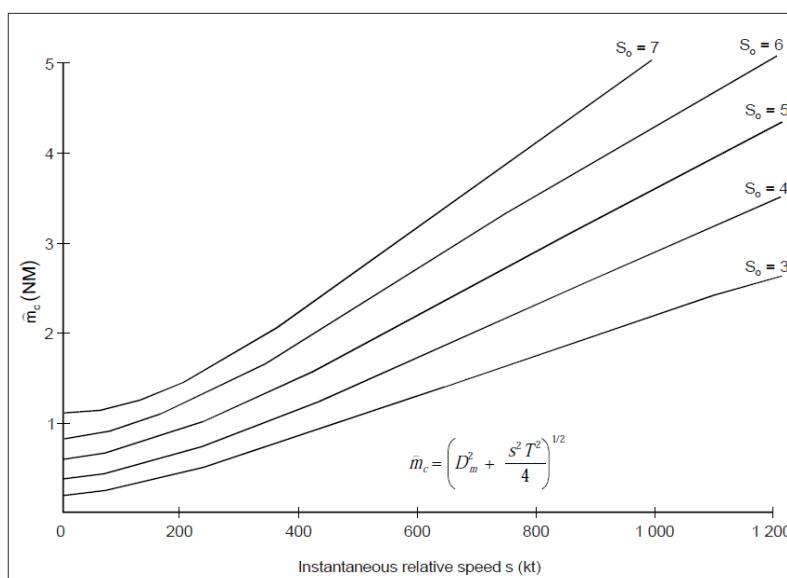
**Úroveň citlivosti (sensitivity level)** je funkcí výšky a definuje úroveň ochrany letounu. Je žádoucí zajistit minimalizaci falešných varování, což je provedeno definováním úrovně citlivosti. Ta ve svém důsledku definuje rozměry teoretického ochranného prostoru obklopující letoun vybavený zařízením TCAS. Citlivost má přiřazenou určitou hodnotu (v rozsahu 1 – 7) v závislosti na výšce letounu. V případě narušení jiným letounem proběhne koordinace této veličiny a zařízení TCAS obou letadel tak vyhodnocuje potřebný rozstup na základě vyšší, ale pro oba stroje stejné hodnoty citlivosti. Oproti tomu ale hodnota vertikálního limitu pro vygenerování opravné rady k vyhnutí (ALIM – altitude limit) je určována pouze z výšky samotného letadla a nedochází zde k žádnému koordinování s narušitelem.

Určování úrovně citlivosti probíhá zcela autonomně podle výšky vlastního letadla (uvedeno v tabulce níže). Pokud je výška indikovaná radiovým výškoměrem v rozsahu 0 – 1000ft, bude vybrána hodnota 2 úrovně citlivosti. Tato hodnota odpovídá režimu poskytování pouze zprávy informace o provozu (TA) bez generování rad k vyhnutí. Pro hodnoty 3 – 7 mohou být generovány oba typy zpráv.

Závislost úrovně citlivosti na výšce (ACAS Guide, Eurocontrol) – tab. 1

Own Altitude	Sensitivity levels (SL)
Stand-by mode	1
0 – 1000 ft AGL	2
1000 – 2350 ft AGL	3
2350 ft AGL – FL50	4
FL50 – FL100	5
FL100 – FL200	6
Above FL200	7

Níže je uveden graf, ze kterého je možné určit maximální vzdálenost, pro kterou může být generováno upozornění. V grafu vystupuje na ose x hodnota okamžité relativní rychlosti letadel v uzlech, na ose y hodnota zmíněná maximální vzdálenost pro vygenerování upozornění a celý graf je závislý na hodnotě úrovně citlivosti (v grafu hodnoty 3 – 7).



Graf maximální vzdálenosti pro generování upozornění (DOC 9863, ICAO) – obr. 6

**Čas varování (warning time)** je s rostoucí výškou větší (roste citlivost). Čas varování je založen na době dosažení k bodu největšího sblížení. Tento bod je anglicky označován jako CPA (closest point of approach) a je definován jako okamžik, kdy šikmá vzdálenost mezi letouny (které jsou vybavené palubním protisrážkovým systémem TCAS) nabývá minimální hodnoty. Verze TCAS II vypočítává čas k bodu největšího sblížení na základě nejhorsího možného předpokladu – že je letoun vybavený TCASem na vstřícném kurzu s narušitelem. Pokud jsou oba letouny ve skutečnosti na vstřícném kurzu, generovaná rada k vyhnutí je založena na správných předpokladech. Pokud letadla nejsou na vstřícných kurzech, předpoklad je mylný a rada k vyhnutí může být vygenerována velmi brzy, někdy dokonce zbytečně. Účel prevence srážky je však zachován.

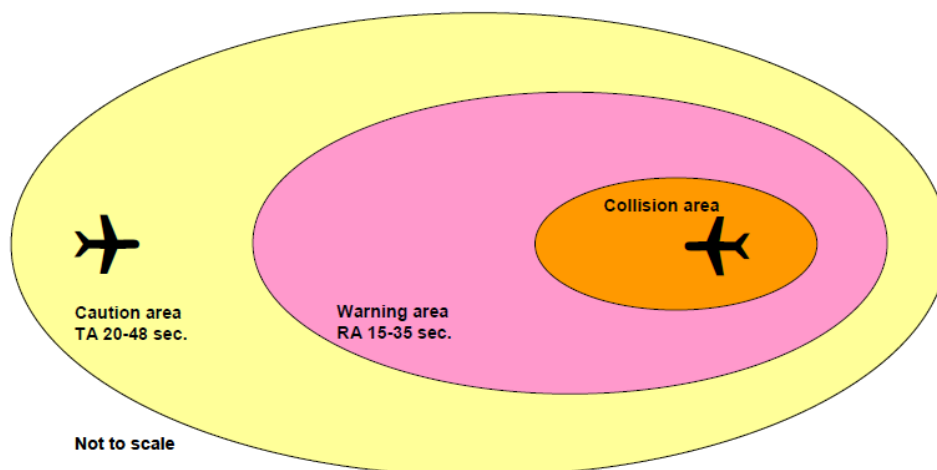


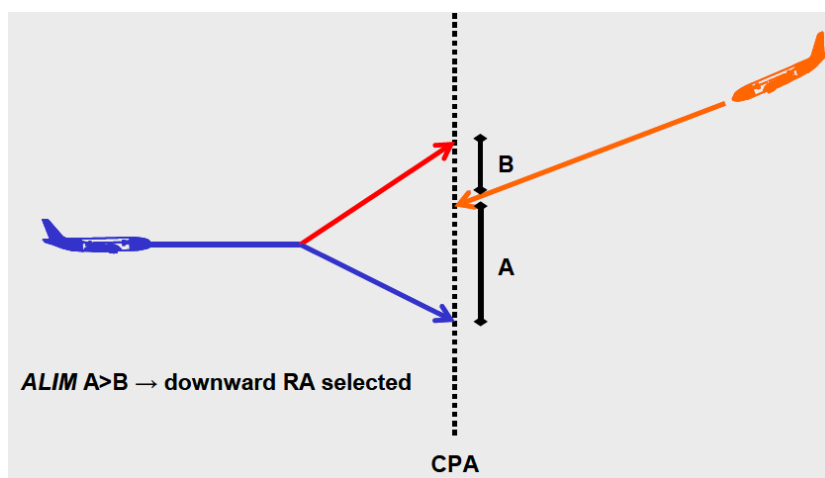
Figure 14: TCAS II protected volume (horizontal view).

Ochranný prostor (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 7

Maximální doba, ve které dojde k vygenerování zprávy upozornění na provoz je 48 vteřin. Pro generování rady k vyhnutí je tento čas 35 vteřin. V případě nenadálých manévru může dojít ke generování zpráv v mnohem menším časovém předstihu nebo dokonce nemusí dojít ke generování zprávy o upozornění na provoz, ale rovnou bude generována rada k vyhnutí. Rada k vyhnutí může být vygenerována ještě před narušením vyžadovaných minim rozstupů nebo i pokud minima nebudou narušena. V Evropě podle statistik Eurocontrolu přibližně ve dvou třetinách vydaných rad k vyhnutí nejsou tato minima narušena.

Po vyhodnocení předchozích faktorů musí také proběhnout dvou-krokový proces před vygenerováním rady k vyhnutí:

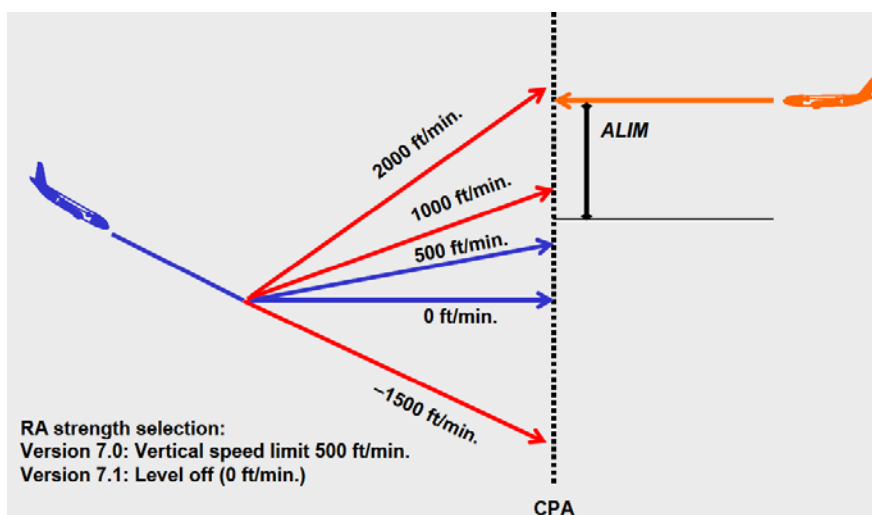
**Určení směru rady k vyhnutí** – nejprve je nutné deklarovat nejvhodnější směr úhybného manévru (stoupání či klesání). Protisrážkový systém vymodeluje předpokládané trajektorie jednotlivých narušitelů vzhledem k bodu největšího sblížení. Vyhodnotí vertikální rozstupy, které by vznikly různými úhybnými manévry a vybere jako vhodný manévr ten s větším ziskem vertikální separace. Na ilustraci níže lze vidět situaci, kdy modré letadlo má možnost úhybného manévru pro stoupání nebo klesání vertikální rychlostí 1500ft/min (se zohledněním standardní reakční doby pilota 5s a vertikálním zrychlením 0,25g). Jako vhodnější manévr pro radu k vyhnutí je vyhodnoceno klesání.



Vyhodnocení směru rady k vyhnutí (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 8

Rada k vyhnutí s křížením výšek je vydána, pokud se letadlo nachází alespoň 100ft pod nebo nad narušitelem při generované radě k vyhnutí ve smyslu stoupání nebo klesání (například letoun pod narušitelem má vygenerovanou radu pro stoupání).

**Určení intenzity rady k vyhnutí** – druhým krokem je určení potřebné vertikální rychlosti úhybného manévru. Výstupem je omezení vztahující se k trajektorii letu buďto omezením vertikální rychlosti, nebo vyžadováním dodržení konkrétní vertikální rychlosti. Intenzita je vždy určena na takovou hodnotu, aby omezila odchylky od původní trajektorie na minimum a zároveň dostačovala k zisku potřebné separace. Níže je obrazový příklad situace, kdy za daných podmínek by byla pro modrý letoun vybrána rada k vyhnutí ve smyslu zahájení stoupání o vertikální rychlosti 500ft/min pro starší verzi 7.0 a pokyn k horizontálnímu letu o vertikální rychlosti 0ft/min pro současnou verzi 7.1.



Vyhodnocení intenzity rady k vyhnutí (ACAS Guide, Eurocontrol) - obr. 9

Po vygenerování rady k vyhnutí platí pro minimální dobu trvání této rady následující pravidla:

- minimální doba zobrazení rady k vyhnutí (od vygenerování až po zprávu: „clear of conflict“) – 5 sekund
- minimální doba pro vydání reverzní rady k vyhnutí (platí pouze pro geometrické reverzní rady, viz níže) – 5 sekund
- minimální doba, než může být vydána zeslabující rada k vyhnutí – 10 sekund
- zesilující rada k vyhnutí není časově omezena.

Pokud dojde ke sblížení a prezentování rady k vyhnutí ve výšce dostupnosti letounu pro aktuální hmotnost, tak není vyloučeno, že by posádka nemohla postupovat podle rady k vyhnutí požadující stoupání. V těchto situacích je přijatelná přeměna rychlosti na výšku, kdy je posádka schopna zahájit stoupavý úhybný manévr za cenu snížení rychlosti. Vygenerování rady k vyhnutí může být někdy omezeno nebo též úplně potlačeno. Protisrážkový systém může přestat generovat rady k vyhnutí vyžadující stoupání v důsledku nedostatečné stoupací výkonnosti letounu ve větších výškách nebo pokud je letadlo v přistávací konfiguraci. Tato omezení jsou nastavena během certifikace zařízení v závislosti na typu letadla. V případě nutného vydání rady k vyhnutí musí protisrážkový systém generovat rady vyžadující klesání a provést koordinaci s narušitelem.

Pro všechna letadla vybavená protisrážkovým systémem platí předdefinované omezení v malých výškách v blízkosti země. Omezení vydávání rad k vyhnutí je definováno na základě výšky nad terénem získané z radiového výškoměru. Limitující hodnoty jsou vyjádřeny v následující tabulce.

Omezení rad k vyhnutí (Pešout) – tab. 2

Typ upozornění	Potlačeno pod výškou
Zvýšení intenzity klesání	1550ft (±100ft) AGL
Klesání	1100ft (±100ft) AGL
Všechny rady k vyhnutí	1000ft (±100ft) AGL
Všechna akustické upozornění	500ft (±100ft) AGL

Hysterezní hodnoty –100ft (pro klesající letadla) a +100ft (pro stoupající letadla) zaručují, že u letadla letícího kolísavě po jedné z výškových hranic nebude logika TCAS oscilovat v těchto výškových omezeních a zůstane zařazena v jedné z nich.

Veškerá zvuková upozornění (upozornění na provoz – TA, rada k vyhnutí – RA) generovaná protisrážkovým systémem TCAS II nebudou posádce prezentována, pokud bylo aktivováno upozornění od zařízení GPWS (ground proximity warning system – zařízení varující před srážkou s terénem) nebo detekce stříhu větru. TCAS se samovolně degraduje do módu poskytující pouze upozornění na provoz – TA a to na dobu trvající ještě 10 sekund poté, co je ukončeno upozornění od GPWS nebo detekce stříhu větru. Během těchto 10 sekund je ovšem plně provozuschopné zvukové upozornění na provoz – TA. Zvukové upozornění „CLEAR OF CONFLICT“ vydávané po ukončení rady k vyhnutí v momentě, kdy narušitel nevytváří nadále riziko sblížení, není vydáno v případě, že je spojení s narušitelem přerušeno. Dojde pouze k odstranění indikace rady k vyhnutí bez akustického upozornění.

### 3.2. Vybavení odpovídačem

Ke správné funkčnosti tohoto protisrážkového systému je tedy nutné, aby byl konfliktní provoz vybaven provozuschopným odpovídačem SSR. Evropská komise svým nařízením č. 965/2012 nařizuje povinnost pro letouny schválené k provozování obchodní letecké dopravy mít na palubě provozuschopný odpovídač. Konkrétní požadavky na vybavení letadel se v jednotlivých zemích mohou lišit, uvedu výňatek z legislativy České republiky pro ilustraci podmínek.

Předpis L-6, svazek I zmiňuje shodně s nařízením č. 965/2012 povinnost pro všechny letouny, jejichž provoz byl schválen pro provozování obchodní letecké dopravy, mít provozuschopný odpovídač jako palubní vybavení. Dále je povinnost vybavení odpovídačem zmiňována v letecké informační příručce (AIP – Aeronautical Information Publication) v části general. Zde je povinnost rozdělena podle požadovaného typu odpovídače takto:

### **3.2.1. Odpovídač v módu A s hlášením tlakové výšky v módu C**

Vybavení tímto odpovídačem, který musí být schopen odpovídat na dotazy v 4096 kódech, je povinné v letové informační oblasti Praha (FIR – flight information region) do letové hladiny 95 (z této podmínky je vyjmuta koncová řízená oblast Praha (TMA – terminal area) a řízený okresek Ruzyně (CTR – control area), neboť zde platí odlišná pravidla uvedená níže) pro následující druhy letadel:

- všechny motorové letouny, vrtulníky a balóny, které vykonávají let podle pravidel pro let za vidu (VFR – visual flight rules) v a nad letovou hladinou 60 nebo v a nad nadmořskou výškou 5000ft (1500m) nad střední hladinou moře (AMSL – above mean sea level), pokud je převodní hladina (TL – transition level) rovna letové hladině 70
- všechna letadla provádějící traťový let podle pravidel pro let za vidu v noci.

### **3.2.2. Odpovídač v módu S s funkčností Elementary Surveillance**

Vybavení tímto odpovídačem s funkčností Elementary Surveillance (ELS) je povinné pro druhy letadel níže uvedených letících podle pravidel pro let za vidu a podle pravidel za letu podle přístrojů (IFR – instrument flight rules):

- pro lety v letové informační oblasti Praha podle pravidel za letu podle přístrojů platí povinnost pro vrtulníky bez zohlednění hmotnosti, letouny s maximální schválenou vzletovou hmotností (MTOW – maximum takeoff weight) 5700kg a méně nebo letouny, jejichž maximální cestovní pravá vzdušná rychlost (TAS – true airspeed) nepřesahuje 250kt (463km/h)
- lety prováděné podle pravidel pro let za vidu v letové informační oblasti Praha nad letovou hladinou 95
- lety prováděné podle pravidel pro let za vidu v koncové řízené oblasti Praha a řízené oblasti Ruzyně.



### **3.2.3. Odpovídač v módu S s funkčností Enhanced Surveillance**

Všechny lety vykonávané v souladu s pravidly pro let podle přístrojů v letové informační oblasti Praha, prováděné letouny s pevnými křídly a maximální schválenou vzletovou hmotností převyšující 5700kg nebo s maximální cestovní pravou vzdušnou rychlostí převyšující 250kt (463km/h) musejí být povinně vybaveny provozuschopným odpovídačem, který vysílá v módu S a obsahuje funkčnost Enhanced Surveillance (EHS).

### **3.2.4. Výjimky**

Letecká informační příručka také obsahuje seznam subjektů, které jsou vyjmuty z výše uvedených závazných podmínek:

- provozovatelé balónů a vzducholodí, kteří provádějí lety v řízeném okrsku Ruzyně, nemusejí svá letadla vybavovat odpovídačem SSR v módu S s funkčností Elementary Surveillance
- letadla vyjmutá z pravidel na vybavení odpovídačem módu S s funkčností Elementary Surveillance musejí být vybavena odpovídačem SSR schopným odpovídat na dotazy v módu A s hlášením tlakové výšky v módu C
- výjimku z povinnosti vybavení odpovídačem v módu A/C může udělit také příslušný řídicí letového provozu na základě žádosti předložené posádkou před vstupem do prostoru odpovědnosti konkrétního řídicího letového provozu a po zvážení aktuální provozní situace
- následující výjimky jsou časově omezeného charakteru, udělují se individuálně a jsou opakovaně přezkoumávány a definovány. Výjimka první je z povinnosti výbavy odpovídačem módu S s funkčností Elementary Surveillance nebo Enhanced Surveillance pro lety prováděné za účelem letových testů nebo letů prováděných z místa výroby či přelétávající lety z a do místa plánované údržby. Výjimka druhá platí pro letadla vybavená odpovídačem módu S s funkčností Enhanced Surveillance, jejichž avionika není schopna provést příjem a vysílání úplné sady požadovaných Downlink Aircraft Parameters (DAPs).

### 3.3. Jednotlivé typy TCAS

Palubní protisrážkový systém TCAS vznikl od počátku svého vývoje v několika variantách. Níže následuje jejich výčet a popis.

#### 3.3.1. TCAS I

Poskytuje pouze informaci o provozu, který se nachází v blízkosti, pro zvýšení situačního povědomí, ovšem tento typ není z výroby určený ke generování rady k vyhnutí. Poskytuje tři úrovně upozornění:

- Ostatní provoz
- Upozornění blízkosti (PA – proximate advisories)
- Upozornění na provoz (TA – traffic advisories)

Vydávání upozornění na provoz (TA) je založeno na metodě času varování – warning time nebo úrovni citlivosti – sensitivity level (obě metody jsou popsány výše). Standardně všechny letouny vybavené odpovídačem a nacházející se ve vzdálenosti ne více než 5 NM jsou touto verzí protisrážkového systému detekovány a následně zobrazeny na palubním zobrazovacím zařízení.

Při vygenerování zprávy upozornění na provoz (TA) dochází také současně ke spuštění akustického upozornění ve znění: „traffic, traffic“ pro informování palubní posádky o skutečnosti vygenerování upozornění na provoz. Po pominutí hrozby sblížení zazní akustické upozornění: „clear of conflict“. Akustická upozornění nejsou generována:

- pokud se letadlo vybavené radiovým výškoměrem nachází pod výškou 400ft indikovanou právě radiovým výškoměrem
- v případě, že letoun není tímto zařízením vybaven, generování akustických upozornění se přerušuje vysunutím přistávacího podvozku
- pokud letoun není vybaven radiovým výškoměrem a je vybaven pevným přistávacím podvozkem, nedojde nikdy (v případě pracujícího zařízení) k přerušování generování akustických upozornění.

Na palubním zobrazovacím zařízení je vyobrazena relativní poloha narušitelů spolu s relativní výškou a vertikální rychlostí (pokud narušitel vysílá údaj o výšce).

Zobrazení potenciálního konfliktního provozu proběhne v dostatečném předstihu před vypočítaným bodem největšího sblížení tak, aby mohla posádka následně provoz identifikovat vizuálně pohledem z kabiny a případně provést potřebný úhybný manévr.

TCAS I využívá pro svou činnost výšku vlastního letadla a výšku narušitele z jeho odpovídače. Pro tento typ je naprosto dostačující pracující odpovídač v módu A/C. S ohledem na skutečnost, že TCAS I negeneruje žádné rady k vyhnutí, není potřeba jakákoliv koordinace pokynů prostřednictvím odpovídače módu S, jako to je u zařízení generujících rady k vyhnutí. Při využití odpovídače módu S pro tento typ protisrážkového systému je výhoda pouze v přesnosti hlášené výšky. Mód A/C hlásí v krocích po 100ft a mód S v krocích po 25ft.

RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) je sdružení, které v roce 1994 publikovalo standard MOPS (Minimum Operational Performance Standards) pro TCAS I pod označením DO-197A. Tato varianta nebyla nikdy od svého vzniku v Evropě vyžadována jako povinná součást palubního vybavení a je určena spíše pro provoz ve všeobecném letectví (GA – general aviation).

### **3.3.2. TCAS II**

Tento typ se v současné době používá v obchodní letecké dopravě, jelikož je ze všech variant nejefektivnější. Oproti verzi TCAS I je verze TCAS II vyspělejší, protože kromě generování zpráv upozornění na provoz (TA) umí generovat rady k vyhnutí (RA) pro manévrování ve vertikální rovině.

Americká komise RTCA ve spolupráci s evropskou EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment) vyvinula standardy MOPS (Minimum Operational Performance Standards) pro TCAS II. Standard pro nejnovější verzi 7.1 byl zveřejněn v dokumentu komise RTCA DO-185B a v dokumentu EUROCAE ED-143. Oba dokumenty jsou veřejně dostupné, ale zpoplatněné. Výrobci popisovaného typu protisrážkového systému musejí splňovat tyto standardy, aby docílili certifikace jejich výrobků.

V současné době existují tři výrobci protisrážkového systému typu TCAS II, všichni tři pocházejí z USA. Jmenovitě se jedná o společnosti Honeywell, ACSS – Aviation Communication & Surveillance Systems a Rockwell Collins. Implementace jednotlivých výrobců se mírně liší, ovšem díky aplikování jednotných standardů jsou funkce, logika vyhýbání a algoritmy koordinování neměnné. Níže je obrázek dvou procesorů zařízení TCAS II (každý od jiného výrobce), které se umísťují do šachty pod kabinou pilotů (avionics bay).



TCAS II procesor, vlevo ACSS a Rockwell Collins vpravo (www.riment.com) – obr. 10

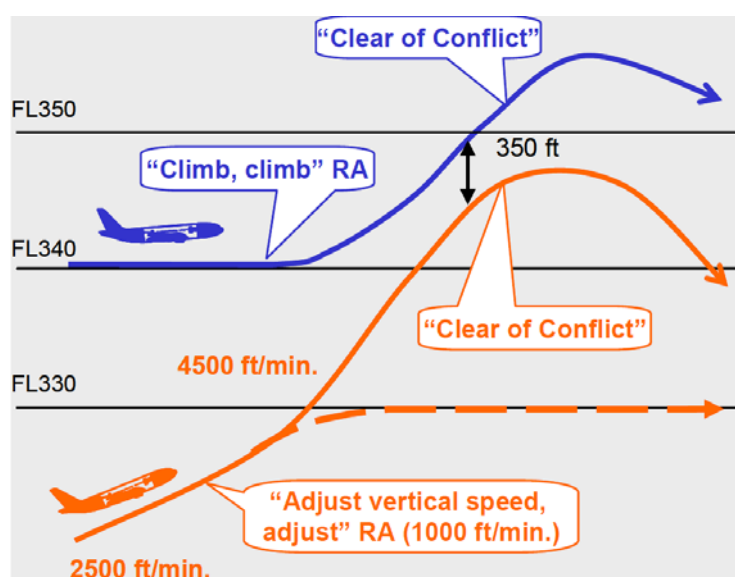
Tyto procesory jsou schopné monitorovat až 30 letadel na nominální vzdálenost 14NM v případě letadel vybavených odpovídacím módu A/C a na vzdálenost až 30NM letadla, která jsou vybavena odpovídacím módu S. TCAS II je navržen tak, aby dotazoval pouze letadla s vertikálním rozstupem menším než 10000ft.

Na základě zhodnocení zkušeností s verzí 7.0 došlo se záměrem zlepšení TCAS logiky k implementaci dvou hlavních změn do současné verze 7.1. Jedná se nový typ rady k vyhnutí „level off“ a vylepšení logiky vydávání reverzních rad k vyhnutí.

Rada k vyhnutí „**level off**“ nahrazuje radu „adjust vertical speed, adjust“ (pokyn ke změně vertikální rychlosti) z předcházející verze 7.0. Význam rady k vyhnutí verze 7.0 spočívá instruování posádky ke změně vertikální rychlosti, jejíž konkrétní hodnota se zobrazí na palubním zobrazovacím zařízení a nabývá hodnot 0ft/min, 500ft/min, 1000ft/min nebo 2000ft/min. Po analyzování zaznamenaných a ohlášených výskytů

generování rady k vyhnutí se zjistilo, že v mnoha případech piloti nereagovali na pokyn „adjust vertical speed, adjust“ správně. Například studie SIRE+ z roku 2007 provedená Eurocontrolem ve francouzském vzdušném prostoru během let 2004 a 2005 zmiňuje, že je zaznamenáno 15 rad vyhnutí, na které piloti zareagovali nesprávně, což vedlo k ještě většímu snížení rozstupů mezi letadly. Tyto nesprávné reakce spočívaly například ve zvýšení vertikální rychlosti, přestože rada k vyhnutí generovala pokyn ke snížení vertikální rychlosti a byly provedeny piloty z leteckých společností z různých států, nejedná se tak pouze o francouzské letecké společnosti.

Níže je uvedena ilustrace vertikálního profilu při nesprávné reakci na radu k vyhnutí doporučující změnu vertikální rychlosti. Oranžový letoun je ve stoupání do povolené letové hladiny 330 vertikální rychlostí 2500ft/min a modrý letoun je v horizontálním letu v letové hladině 340. V důsledku nedodržení doporučení snížit vertikální rychlost na 1000ft/min při stoupání do povolené letové hladiny a znalosti provozu v blízké letové hladině dojde k vygenerování rady k vyhnutí pro oba letouny. Modrému letounu se vygeneruje pokyn „climb, climb“, tedy pokyn ke stoupání, což posádka správně následuje. Oranžovému letounu se vygeneruje rada „adjust vertical speed, adjust“, tedy s pokynem ke změně vertikální rychlosti na 1000ft/min, avšak pilot provedl opačný úhybný manévr. Místo snížení vertikální rychlosti na hodnotu 1000ft/min došlo naopak k jejímu zvýšení až na hodnotu 4500ft/min. Kvůli tomu došlo ke snížení vertikálního rozstupu až na pouhých 350ft (107m).



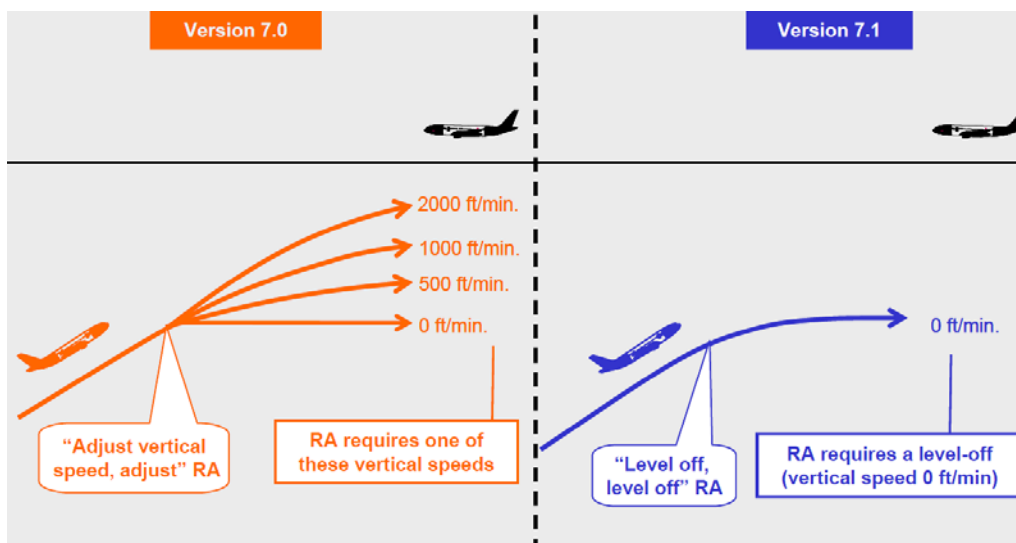
Nesprávná reakce na radu k vyhnutí (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 11

Jmenovaná studie také popisuje, že některé letecké společnosti při výcviku pilotů pokyn „adjust vertical speed, adjust“ nesprávně vysvětlovaly jako pokyn ke snížení vertikální rychlosti, pravděpodobně kvůli nedostatečné znalosti anglického jazyka. Pokyn ke změně vertikální rychlosti ve verzi 7.0 byl ve svém akustickém upozornění nejednoznačný a posádka tak nebyla zvukovým pokynem upozorněna na konkrétní úhybný manévr, který má provést. V případě, že posádka nebyla tvořena rodilými mluvčími, pravděpodobnost nesprávné reakce na tuto radu k vyhnutí se zvyšovala. Celkově dvě třetiny ze všech generovaných rad k vyhnutí byly právě rady ke změně vertikální rychlosti.

Také jsou známé případy, ve kterých byla vygenerována rada k vyhnutí s doporučením změny vertikální rychlosti v důsledku sblížení dvou letadel, a správné následování této rady způsobilo přestoupání povolené letové hladiny a došlo k řetězové reakci, kdy byla rada k vyhnutí generována i třetímu letounu, který původně nevytvářel žádné riziko sblížení (TCAS-induced collision). Toto způsobuje narušení plynulosti letového provozu a zvyšuje riziko sblížení původně nezúčastněných letadel.

Ve jménu vyřešení těchto nedostatků pokynu ke změně vertikální rychlosti došlo ve verzi 7.1 k razantní změně a tento pokyn byl zcela nahrazen pokynem „level off, level off“, tedy pokynem k přechodu do horizontálního letu s vertikální rychlostí 0ft/min. Významem tohoto pokynu je rada posádce, aby převedla letoun do horizontálního letu. Rada „level off, level off“ může být vydána jako počáteční rada (initial resolution advisory), ale také jako následná zeslabující rada (weakening resolution advisory).

Značně prospěšný je pokyn „level off, level off“ ve své jednoznačnosti, kdy má pouze jeden význam oproti pokynu ve verzi 7.0 „adjust vertical speed, adjust“, který v sobě skýtal významů sedm (tři konkrétní hodnoty vertikálních rychlostí pro stoupání, tři stejné hodnoty pro klesání a navíc hodnotu 0ft/min pro horizontální let).



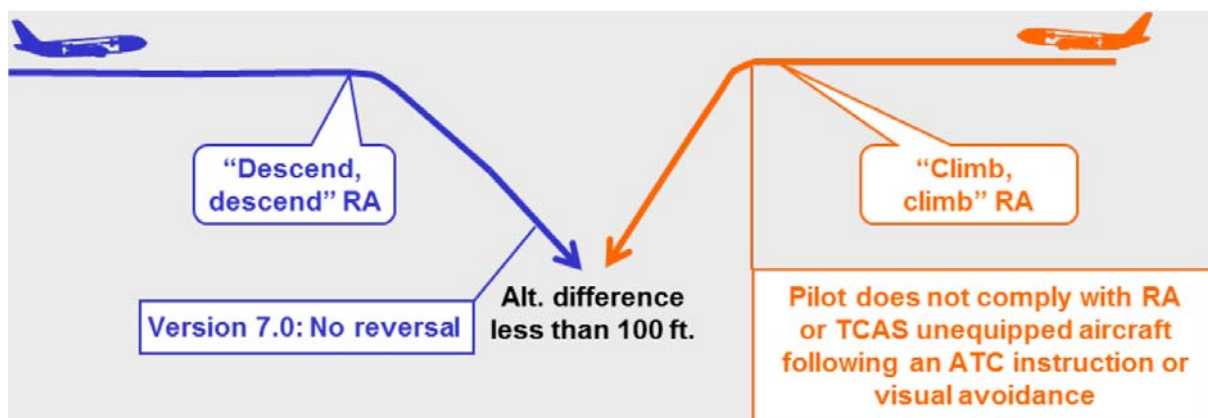
Porovnání TCAS verze 7.0 vlevo a verze 7.1 vpravo (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 12

Další výhodou přináší tento pokyn díky menší vertikální odchylce od povolené letové hladiny v porovnání s pokynem verze 7.0, kdy bývala instrukce ke změně vertikální rychlosti na konkrétní hodnotu a vertikální odchylka od povolené letové hladiny se tak nadále zvyšovala. To ve svém důsledku minimalizuje pravděpodobnost generování rady k vyhnutí pro třetí, původně nezúčastněné letadlo (TCAS-induced collision).

Druhou výše zmíněnou změnou ve verzi 7.1 je přepracování funkční logiky vydávání **reverzních rad k vyhnutí (reversal resolution advisory)**. Logika předchozí verze 7.0 umožňovala vydat reverzní radu k vyhnutí (například pokyn ke stoupání „climb, climb NOW“ nebo opačný pokyn ke klesání „descent, descent NOW“) při sblížení letadel, jejichž vybavení umožňovalo vzájemnou koordinaci a pokud výpočet původně vydané rady k vyhnutí indikoval, že bez změny stávající trajektorie letu nebude dodržen dostatečný vertikální rozstup.

Poté, co byl TCAS II ve verzi 7.0 na počátku roku 2000 uveden do provozu, vyšlo najevo, že reverzní logika chybně vyhodnocuje sblížení s velmi malým vertikálním rozstupem. Pokud došlo k situaci, že se dvě letadla po vydání rady k vyhnutí a jejím nesprávném vyhodnocení posádkou, vedoucí k provedení nesprávného úhybného manévru sblížila na rozptyl pouhých 0ft – 100ft (30m) vertikálního rozstupu, verze 7.0 nevydala žádnou reverzní radu k vyhnutí.





TCAS II verze 7.0, nedostatečná reverzní logika (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 13

Výše je grafické znázornění popisované chyby reverzní logiky verze 7.0. Modrý letoun dostane vygenerovanou radu k vyhnutí ve smyslu pokynu ke klesání a posádka ji správně následuje. Naproti tomu posádce oranžového letounu protisrážkový systém vygeneruje radu k vyhnutí ve smyslu stoupání a posádka provede úhybný manévr v opačném smyslu. K této situaci může dojít, pokud by řídicí letového provozu vydal posádce oranžového letounu pokyn ke klesání a posádka by v rozporu s platnými postupy následovala tento pokyn namísto pokynu protisrážkového systému.

Další možností, proč posádka provede úhybný manévr v opačném smyslu oproti generované radě k vyhnutí, je skutečnost, že provádí manévrování na základě vizuálních referencí pohledem z kabiny ven nebo není její letoun vybaven protisrážkovým systémem. Podle evropského projektu Eurocontrolu SIRE+ zaměřeného na bezpečnost letu ve spojení se systémem TCAS II došlo v období 2002 – 2007 k osmi těsným sblížením v evropském vzdušném prostoru. Studie zmiňuje, že v každém z těchto případů došlo k velmi závažným snížením vertikálního rozstupu a ke kolizím nedošlo jen díky náhodě.

K několika takovým situacím v historii již došlo, za zmínku stojí událost, která se odehrála v roce 2001 mezi letouny Boeing B747 a McDonnell Douglas DC-10, oba provozovanými společnostmi Japan Airlines v blízkosti japonského města Yaizu. V reakci na jejich vypočítané sblížení došlo ke generování rady k vyhnutí pro obě posádky, kterou posádka letounu DC-10 následovala, ale posádka B747 nikoliv

a následovala pokyn řídicího letového provozu, který v rozporu s radou vyhnutí vydal pokyn k okamžitému klesání. Ke srážce nedošlo jen díky agresivnímu úhybnému manévru na základně vizuální reference, vedoucí ke snížení vertikálního rozstupu až na zhruba 135m. Během úhybného manévru došlo ke zranění 100 lidí na palubě B747 z celkového počtu 427 osob na palubě.

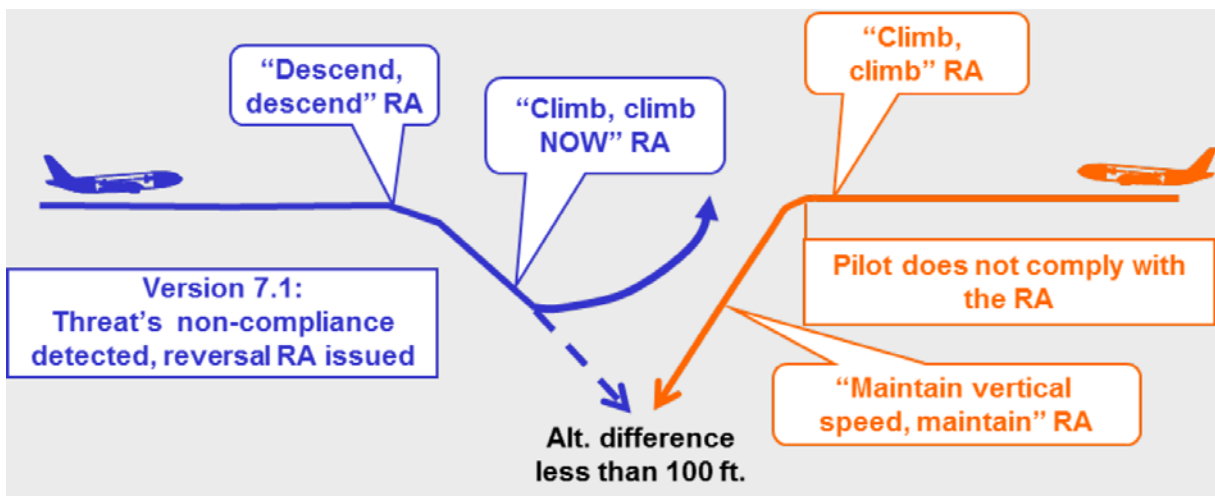
Vylepšená logika vydávání reverzních rad ve verzi 7.1 monitoruje trajektorii letu po vydání počáteční rady k vyhnutí u letadel, která jsou schopná vzájemně koordinovaných pokynů (nutné palubní vybavení TCAS II a odpovídač módu S), nebo v případě sblížení letounu vybaveného protisrážkovým systémem a letounu bez systému TCAS II dojde k tomuto vyhodnocování trajektorie pouze u prvního zmíněného letadla vybaveného zařízením TCAS II (které může následně vydávat nekoordinované reverzní rady k vyhnutí).

Reverzní rada k vyhnutí se rozděluje na dva typy. Prvním popisovaným typem bude geometrická reverzní rada k vyhnutí (geometric reversal) a druhým je koordinovaná reverzní rada k vyhnutí (coordination reversal).

**Geometrická reverzní rada k vyhnutí (geometric reversal)** – Pokud protisrážkový systém detekuje, že při sblížení dvou letadel se trajektorie obou letadel nezmění ve smyslu vygenerované rady k vyhnutí, vydá reverzní radu k vyhnutí. Ta bude vygenerována na palubách obou letadel a to podle následující logiky:

- letadlo měnící trajektorii letu správně podle počáteční rady k vyhnutí obdrží reverzní radu k vyhnutí v opačném smyslu, a tedy vyžaduje změnu aktuálního úhybného manévru (pokud počáteční rada k vyhnutí dává pokyn ke stoupání, podle kterého posádka postupuje, reverzní rada vydá pokyn ke klesání (vyžadující okamžitou změnu manévru)
- letadlo nepostupující změnou trajektorie podle vydané počáteční rady k vyhnutí obdrží reverzní radu k vyhnutí v opačném smyslu, než byla prvotní rada k vyhnutí, ale zároveň ve smyslu již letěné trajektorie a nevyžadující změnu manévru (pokud je počáteční rada vydaná ve smyslu klesání, ale posádka zahájí stoupavý manévr v rozporu s touto radou, vydaná reverzní rada k vyhnutí bude vyžadovat stoupání a tak nebude vyžadována žádná další změna trajektorie tohoto letounu).

Níže je uvedena ilustrace takového případu. Oba letouny se nacházejí na vstřícných kurzech a ve stejné letové hladině. Protisrážkový systém modrého letounu vygeneruje radu k vyhnutí s pokynem k zahájení klesání a na palubě oranžového letounu dojde k prezentování rady k vyhnutí ve smyslu stoupání. Modrý letoun postupuje správně podle rady k vyhnutí a zahájí klesání, naproti tomu oranžový letoun postupuje v rozporu s vydanou radou k vyhnutí (nebo není vybaven protisrážkovým systémem) a zahájí rovněž klesání. Oba letouny se tedy stále nacházejí na kolizním kurzu a v případě, že nedojde ke změně trajektorie, dojde k vzájemné srážce.



TCAS II verze 7.1, reverzní logika (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 14

Podmínkou pro vygenerování reverzní rady k vyhnutí je:

- doba minimálně 4 sekundy před bodem největšího sblížení (CPA) vypočítaným protisrážkovým systémem v souladu s předpokladem, že čas menší než tato hodnota nemusí být dostatečný pro provedení vhodného úhybného manévru posádkou a zároveň platí, že
- minimální doba mezi vydáním počáteční rady k vyhnutí a vygenerování reverzní rady k vyhnutí je 10 sekund (pokud by tato doba byla menší, či by dokonce tento limit nebyl, nemusela by mít posádka dostatek času k provedení manévru v souladu s počáteční radou k vyhnutí).

**Koordinovaná reverzní rada k vyhnutí (coordination reversal)** – Pokud protisrážkové systémy dvou letadel detekují nebezpečí sblížení, vydají radu k vyhnutí pro posádky obou letadel. Ve většině případů protisrážkové systémy detekují narušitele v trochu jinou dobu, než narušitel detekuje toto letadlo. Z důvodu této

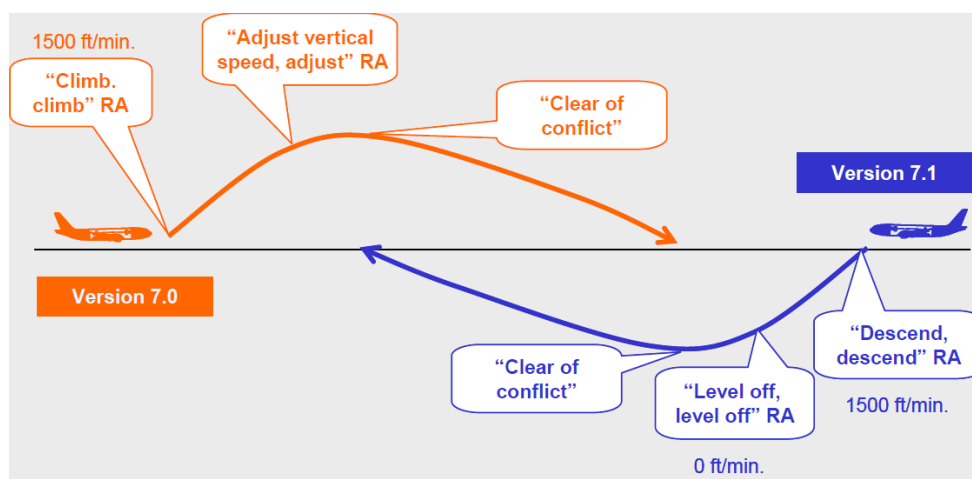
časové prodlevy mohou obě letadla vydat zpočátku radu k vyhnutí ve stejném smyslu úhybného manévru. Díky neustále probíhající datové komunikaci mezi letadly tuto chybu odhalí jeden z protisrážkových systémů a vydá reverzní radu k vyhnutí. Určení zařízení, které vydá reverzní radu k vyhnutí, probíhá na základě porovnání 24 bitové adresy. Odpovídač s vyšší hodnotou 24 bitové adresy se označuje jako „slave aircraft“ a vydá reverzní radu k vyhnutí v opačném smyslu než druhé letadlo s nižší hodnotou adresy odpovídače, které se označuje jako „master aircraft“. Toto druhé „master“ letadlo nevygeneruje žádnou reverzní radu k vyhnutí a zachová indikaci původní rady k vyhnutí.

Pokud je vydána jakákoliv rada k vyhnutí, přepočítává protisrážkový systém trajektorie obou dotčených letounů každou jednu sekundu. Pokud výpočtem dojde k výsledku, že momentální úhybný manévr nezajistí dostatečný vertikální rozstup, vydá následnou radu (subsequent advisory). Ta se rozděluje na tři možné konkrétní rady: zesilující rada k vyhnutí, reverzní rada k vyhnutí (již popisována výše) a zeslabující rady k vyhnutí. Na první dva typy je nutná reakce posádky v rámci časového intervalu 2,5 sekund s vertikálním zrychlením 0,25g pro všechny následné rady (kromě případů, kdy je v rámci vydané rady vyžadováno zvýšení vertikální rychlosti nebo je generována reverzní rada k vyhnutí a je vyžadováno manévrování s akcelerací 0,35g).

V předchozí verzi protisrážkového systému TCAS II (7.0) je vydaná rada k vyhnutí omezující vertikální rychlost („monitor vertical speed“ – pouze preventivní pokyn nebo „adjust vertical speed, adjust“ – pokyn vyžadující změnu vertikální rychlosti) zesílena vydáním **zesilující rady k vyhnutí (strengthening resolution advisory)** na více omezující vertikální rychlost. Tato zesilující rada může být „adjust vertical speed, adjust“ nebo pokyn ke klesání či stoupání nebo to může být pokyn k udržování vertikální rychlosti „maintain vertical speed, maintain“, případně pokyn „maintain vertical speed crossing maintain“.

Dále TCAS II také umí vydávat **zeslabující rady k vyhnutí (weakening resolution advisory)**. Pokud protisrážkový systém podle logiky vyhýbání se srážkách vyhodnotí, že změna trajektorie dle doposud vydaných rad k vyhnutí vedla ke zvýšení separace na hodnotu rovnou nebo větší než ALIM před bodem největšího sblížení (CPA), bude

vydána zeslabující rada k vyhnutí. Splnění předchozí podmínky znamená, že letadla mají od sebe zajištěný dostatečný rozstup ve vertikální rovině, nikoliv však v horizontální. Následná zeslabující rada k vyhnutí byl pokyn „adjust vertical speed, adjust“ ve verzi 7.0 s významem pro změnu vertikální rychlosti na hodnotu 0ft/min a ve verzi 7.1 je vydán pokyn „Level off, level off“. Důvodem pro tuto radu je snaha o minimalizování odchylky od původní letové hladiny.



TCAS II verze 7.1, zeslabující rada k vyhnutí (ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 15

**Koordinace** protisrážkových systémů TCAS II probíhá na základě vysílání RAC – resolution advisory complement. Každý protisrážkový systém při vygenerování rady k vyhnutí zároveň vysílá dotazy ostatním letadlům prostřednictvím datové komunikace módu S. Zařízení, které dané vysílání přijme, na něj následně neodpovídá. Přijetí vysílání RAC zajistí, že bude omezeno generování možných rad k vyhnutí v určitém smyslu dotčenými protisrážkovými systémy. Koordinace využívá stejné frekvence, jako jsou dotazy a odpovědi odpovídače módu S, tedy 1030/1090 MHz a koordinační signály jsou vysílány každým letadlem během generování rady k vyhnutí nejméně jednou za jednu sekundu. Poté, co není rada k vyhnutí nadále generována (letouny nejsou považovány vzájemně za hrozbu), ustává koordinační komunikace.

Obsahem koordinačního vysílání je informace o smyslu úhybného manévru generovaného radou k vyhnutí (zda stoupat, či klesat a v jaké doporučené vertikální rychlosti). Tato informace je vyjádřena ve formě doplňku. Pokud jedno letadlo vygenerovalo radu pro stoupaní, vyše zároveň RAC a druhý narušitel, který

toto přijme, je následně omezen v generování rad k vyhnutí pouze ve smyslu doporučení klesání. V koordinačním vysílání je také obsažena informace o tom, zda bylo generováno „crossing RA“. Poté, co úspěšně proběhne koordinace, každý protisrážkový systém generuje intenzitu rady k vyhnutí nezávisle na druhém a není tedy předmětem koordinace.

Může dojít k situaci, že se dvě letadla detekují ve stejný čas jako hrozby a bez vzájemného přijetí koordinačního vysílání RAC generují radu k vyhnutí nezávisle na druhém. V tento moment není ovšem zaručeno, že oba protisrážkové systémy aplikují úhybný manévr ve stejném smyslu (například oba doporučí zahájit klesání). Situace je poté vyřešena na základě vygenerování reverzní rady s určením priorit podle 24 bitových adres.

Podle studie Eurocontrolu přibližně v jedné polovině případů, kdy dva letouny vytváří nebezpečí srážky, je vygenerována rada k vyhnutí jen na palubě jednoho letadla, zatímco na palubě druhého letadla může dojít k vygenerování pouze zprávy upozornění na provoz. Podle studie „Collision risk due to TCAS safety issues“, která analyzovala data ze vzdušného prostoru Francie a Velké Británie, kde identifikovala celkem 1268 případů vygenerovaných rad k vyhnutí pro civilní letouny v období jednoho roku a pouze ve zhruba 15% došlo k vygenerování rad k vyhnutí na palubách obou letadel. Ve zbývajících 85% případů byla vygenerována rada k vyhnutí pouze na palubě jednoho letounu.

Tento jev lze demonstrovat na případu dvou letadel, z nichž jedno letadlo provádí horizontální let a druhé se nachází pod prvním a provádí stoupavý let. S vysokou pravděpodobností dojde k vygenerování rady k vyhnutí nejprve na palubě tohoto stoupajícího letadla. Pokud posádka provede úhybný manévr v souladu s radou, nebude na palubě letadla provádějící horizontální let vygenerována rada k vyhnutí (za předpokladu, že vertikální rychlost stoupajícího letadla není příliš vysoká).

Ve výjimečných případech může být vygenerována rada k vyhnutí na základě detekce vlastního vysílání (protisrážkový systém sleduje své vlastní vysílání a považuje se za narušitele). Na palubním zobrazovacím zařízení se zobrazí narušitel ve stejné výšce a stejné pozici jako vlastní letadlo. Podle výrobního

nastavení TCAS II vyřadí ze sledovaných narušitelů ten signál, jenž obsahuje stejnou 24 bitovou adresu jako odpovídač vlastního letadla, ovšem vlivem různých příčin nemusí být toto vždy splněno. Pokud bude adresa vlastního odpovídače nastavena nesprávně, může k této situaci dojít.

Pokud je vygenerována rada k vyhnutí, je tato informace odeslána řídicímu letového provozu prostřednictvím datové komunikace módu S. K předání této zprávy je využita frekvence 1090 MHz, která standardně slouží pro odpovědi palubního odpovídače na dotazy jiného zařízení. V této zprávě je tedy informace předána jen na základě dotazu pozemního zařízení. Protisrážkový systém ale informaci o vygenerování rady k vyhnutí vyše také automaticky využitím frekvence 1030 MHz a je určena pro pozemní stanice. Tato zpráva je vysílána ihned v momentě vygenerování rady k vyhnutí a následně periodicky jedenkrát za sekundu. Poté, co rada k vyhnutí již není nadále generována, vysílá palubní zařízení po dobu 18 sekund zprávu o ukončení konfliktu.

### **3.3.3. TCAS III**

Tento typ byl zpočátku vývoje pojmenován jako TCAS II Enhanced, jelikož nosnou myšlenkou pro vznik nového typu protisrážkového systému byla možnost poskytování rad k vyhnutí nejen ve vertikální, ale také v horizontální rovině. TCAS III vycházel z velké části z předchozího typu TCAS II a na jeho vzniku se podílelo několik společností, které se již v minulosti podílely na vývoji předchozích typů. Během vývoje se předpokládalo, že by v případě sblížení letounů byl protisrážkový systém schopen vydat pokyn například: „turn left, climb” – zatoč vlevo, stoupej – a při postupování posádek podle těchto pokynů by se vertikální i horizontální rozstup mezi letadly zvětšil více a rychleji než při pouhém vertikálním úhybném manévru. Nesporná výhoda možnosti provádět horizontální úhybné manévry se projeví při snížení rozstupů mezi letadly v blízkosti země. V takovém případě jsou možnosti vertikálních úhybných manévru omezené a horizontální manévry je mohou plně nahradit.

Podle Lincoln Laboratory Journal z roku 1984 byla pro vývoj tohoto typu využita směrová anténa, která již byla využita u typu TCAS II. Účelem této antény bylo získat relativní zaměření narušitelů vůči vlastnímu letadlu, aby bylo možné generovat



horizontální úhybné manévry (zda vydat pokyn k točení doleva, nebo doprava). Během vývoje se ovšem došlo k závěru, že přesnost takové antény není dostatečná. Přesnost určení relativního směru cíle snižovaly odrazy signálu od celků vlastního letadla (například trup, křídlo aj.) nebo byla také určující vzdálenost směrové antény od jiných antén, umístěných v blízkosti. Po několika letech testování byl proto další vývoj roku 1995 trvale zastaven. Koncept TCAS III se vyvinul do konceptu TCAS IV.

#### **3.3.4. TCAS IV**

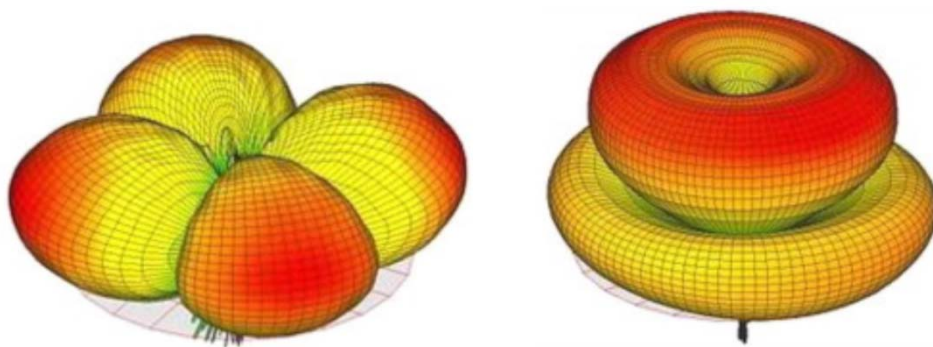
Zásadní změnou ve zpracování dat přináší TCAS verze IV, která komunikuje s ostatními protisrážkovými systémy pomocí módu S. Díky této datové komunikaci může dojít k výměně potřebných dat, jako je poloha, rychlost a hodnota zrychlení. Tato data jsou získána z následujících palubních zařízení: navigační systém GPS (global positioning system), inerciální referenční systémy, palubní počítač FMC (flight management computer) a aero-metrické centrály (vertikální rychlosti, rychlost letu a výška letu). Hodnoty jsou obsaženy v odpovědi protisrážkového systému módu S a je tím eliminována nepřesnost směrové antény využívané u předchozí verze TCAS III.

Verze TCAS IV je také schopna generovat radu k vyhnutí v horizontálním smyslu, nicméně po několikaletém vývoji byl následující postup zastaven. Důvodem byl vznik nové datové technologie ADS-B (automatic dependent surveillance – broadcast), která umožňuje širší využití.

## **4. Aktuální stav problematiky**

V současné době se jako protisrážkový systém v obchodní letecké dopravě využívá jediný certifikovaný systém – TCAS II. Ten se na palubě skládá z následujících komponentů:

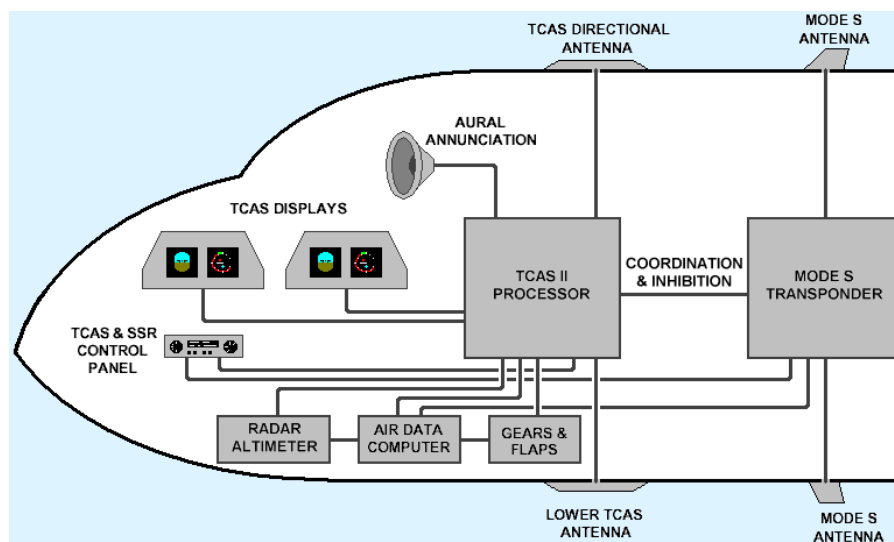
- Procesorová jednotka (computer unit) – zajišťuje sledování a vyhodnocování narušitelů, logiku vyhýbání a generování zpráv upozornění na provoz a rad k vyhnutí.
- Ovládací panel – určený pouze pro ovládání protisrážkového systému TCAS s módy: OFF, STBY, ON nebo sdružený panel pro TCAS a odpovídač s módy: STBY, ALT RPTG OFF, XPNDR, TA, TA/RA.
- Dvě antény pro TCAS – jedna směrová anténa je nainstalována na vrchu trupu a druhá (všesměrová nebo směrová) je umístěna zespodu na trupu. Antény vysílají dotazy na frekvenci 1030 MHz s různou intenzitou do čtyř směrů oddělených devadesáti stupni. Spodní anténa vysílá méně dotazů s menší intenzitou než horní anténa a obě přijímají odpovědi na frekvenci 1090 MHz.
- Dvě antény pro odpovídač – k předchozím dvěma anténám jsou nutné dvě antény sloužící pro odpovídač módu S, jež jsou shodně umístěny na horní a dolní části trupu letadla. Odpovídač přijímá dotazy na frekvenci 1030 MHz a vysílá odpovědi na frekvenci 1090 MHz. Vzhledem ke kombinaci frekvencí odpovídač/TCAS, kdy odpovídač vysílá na stejné frekvenci, na které TCAS přijímá odpovědi, je nutná funkce potlačující přijímání jednoho zařízení, pokud druhé vysílá.



Vyzařovací diagram směrové (vlevo) a všesměrové (vpravo) antény

([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) – obr. 16

- Propojení s odpovídačem módu S – pro možnost koordinování generovaných rad k vyhnutí. V případě selhání palubních odpovídačů módu S dojde k automatickému přepnutí TCAS II do módu STBY.
- Propojení s aero-metrickou centrálou – nutné pro získání údajů o výšce
- Propojení s radiovým výškoměrem – pro možnost potlačení generování rad k vyhnutí v blízkosti země a určení úrovně citlivosti
- Reprodukory – pro akustická upozornění
- Palubní zobrazovací zařízení – skládá se ze zařízení sloužící k zobrazení detekovaného provozu a ze zařízení pro zobrazení generované rady k vyhnutí. Provedení mohou být různá, nicméně poskytované informace jsou neměnné (standarty pro zobrazení jsou publikovány v TCAS II MOPS).
- Součástí jsou i další komponenty, například snímač polohy přistávacího podvozku a klapky, či provozní dostup letadla.



Schematické zobrazení TCAS II (www.qinetiq.com) – obr. 17

#### 4.1. Zobrazení výstupu posádce

**Obrazovka pro znázornění provozu (traffic display)** indikuje relativní horizontální i vertikální polohu narušitelů vzhledem k vlastnímu letadlu. Primárním účelem této obrazovky je usnadnění vyhledávání blízkého provozu posádkou, případně včasná příprava na úhybný manévr a zvýšení situačního povědomí posádky.

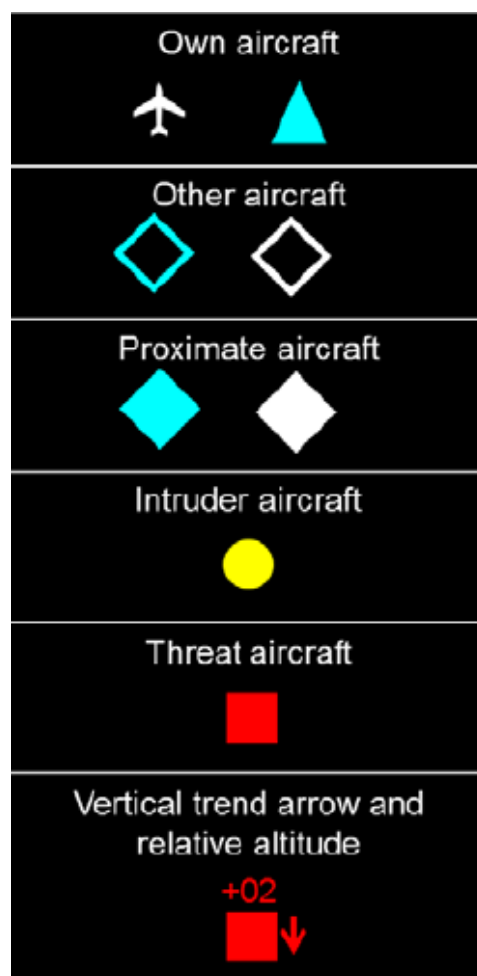
Obrazovka může mít stálý režim zobrazení provozu nebo volitelného zobrazení v kombinaci s jinými režimy zobrazení. Ve druhém případě dojde automaticky k přepnutí na režim zobrazení provozu při vygenerování zprávy upozornění na provoz nebo rady k vyhnutí. Momentálně zobrazení existuje ve formě, kdy se samostatně zobrazuje pouze provoz, sdílená obrazovka se zobrazením výnosu z meteorologického radaru, obrazovka s mapovým zobrazením nebo CDTI (cockpit display of traffic information) – zobrazení provozu v kombinaci s technologií ADS-B. Tyto obrazovky mají zpravidla možnost nastavení vzdálenosti, na kterou chce mít posádka vyobrazený okolní provoz.

Pro snadnou identifikaci cílů na obrazovce je jejich vyobrazení rozděleno podle tvarů a barev na tmavém pozadí. Symbol vlastního letadla je vyobrazen bílou nebo tyrkysovou barvou se symbolem letadla a jeho poloha je závislá na konkrétním provedení obrazovky:

- Prázdný kosočtverec – ostatní provoz
- Plný kosočtverec – blízký provoz
- Žlutý kruh – provoz generující upozornění na provoz (TA)
- Červený čtverec – provoz generující radu k vyhnutí.

Provoz nacházející se do horizontální vzdálenosti 6 NM a vertikální vzdálenosti 1200 ft od vlastního letadla se nazývá blízký provoz. Jeho vyobrazení plného kosočtverce zvyšuje situační povědomí posádky a nevyvolává žádná upozornění.

Přesnost zobrazení okolního provozu je závislé na zvoleném měřítku zobrazení. Při zvolené zobrazené vzdálenosti do 10 NM je přesnost určení vzdálenosti  $\pm 1$  NM a přesnost určení směru  $\pm 10$  stupňů.



Zobrazení cílů TCAS II  
(ACAS Guide, Eurocontrol) – obr. 18

Pokud narušitel oznamuje svou výšku, je na obrazovce prezentována relativní výška tohoto narušitele ve stovkách stop. Pokud je detekované letadlo výše než vlastní letadlo, je relativní výška indikována nad jeho symbolem, pokud je níže než vlastní letadlo, je výška indikována pod symbolem. Zároveň je také symbol doplněn indikátorem vertikálního trendu. Podmínkou pro zobrazení šipky indikující, zda narušitel stoupá, nebo klesá, je minimální hodnota vertikální rychlosti, která musí být alespoň 500 ft/min.

Standardně je okolní provoz prezentován posádce prostřednictvím obrazovky provozu za podmínky, že se nachází v relativní výšce  $\pm 2700$  ft od vlastního letadla. Když se ovšem provoz nachází mimo tuto toleranci a způsobí vyvolání upozornění na provoz nebo rady k vyhnutí, bude vyobrazen odpovídající barvou a relativní výškou.

V některých provedeních protisrážkového systému TCAS II je posádce umožněn výběr výškového módu, který chtějí zobrazit. Jsou to dva módy, „above“ a „below“. První mód slouží k zobrazení detekovaného provozu ve výškovém rozmezí 2700 ft pod a 9900 ft nad vlastním letounem. Tento mód je určen pro zvýšení situačního povědomí při stoupání, zatímco druhý mód „below“ při klesání a zobrazuje provoz 2700 ft nad a 9900 ft pod vlastním letounem. Některé provedení umožňují také kombinaci obou módů.

V některých případech nemusí být k dispozici spolehlivé směrové zaměření narušitele, který zapříčinil generování upozornění na provoz nebo radu k vyhnutí. Relativní směr konfliktního provozu slouží pouze k zobrazení na obrazovce provozu a nemá žádnou spojitost s generováním upozornění nebo rad k vyhnutí. Pokud dojde k této situaci, je daný konfliktní provoz zobrazen s hodnotami letové hladiny, vzdálenosti, relativní výšky a vertikální rychlosti bez doprovázejícího symbolu. Pokud je takto generovaná zpráva upozornění na provoz, je text zobrazen žlutým textem, pokud rada k vyhnutí, je text zobrazen červeným písmem. Zároveň ve vzdušném prostoru s vysokou hustotou provozu nemusí být na zobrazovacím zařízení vyobrazeny veškeré letouny, ovšem při generování jakékoliv zprávy je tento provoz vyznačen symbolem a barvou odpovídající dané zprávě.

Pro TCAS II není směrové zaměření narušitele zobrazeného na obrazovce provozu dostatečně přesné pro to, aby ho mohla posádka využít jako jedinou referenci pro provedení horizontálního úhybného manévru ještě před generováním rady k vyhnutí. Horizontální manévrování založené pouze na referenci obrazovky provozu je z tohoto důvodu zakázané.

**Obrazovka pro znázornění rad k vyhnutí (RA display)** se vyskytuje ve dvou podobách. První formou je znázornění na variometru IVSI (Instantaneous Vertical Speed Indicator), kde je provoz znázorněn ve středu přístroje (s kružnicí znázorňující 2 NM od vlastního letounu) a po obvodu je umístěna stupnice vertikální rychlosti. Na ní se také při vygenerování rady k vyhnutí zobrazí doporučený manévr v podobě červeného zbarvení hodnot na stupnici, kterým se má posádka vyhnout (pokud je červeně znázorněna hodnota 1500 ft/min a výš, je posádce doporučováno letět vertikální rychlostí menší než 1500 ft/min. Zobrazení může být také doprovázeno zeleným zbarvením stupnice indikující doporučený manévr.

Druhá forma zobrazení je realizována na palubách letounů vybavených EFIS (electronic flight instrument system). Rady k vyhnutí jsou zde zobrazeny na primární letové obrazovce PFD (primary flight display) a zobrazení provozu je na navigační obrazovce ND (navigation display). Zobrazení na PFD se dále dělí na dva možné způsoby provedení:

- zobrazení na umělém horizontu – rada k vyhnutí je prezentována červeně přímo na umělém horizontu. Znázorňuje úhel podélného sklonu, kterému se má posádka vyhnout. Tento způsob zobrazení neumožňuje generování zeleného doporučení úhybného manévru, umožňuje pouze červené znázornění manévru, který proveden být nemá.
- zobrazení na variometru PFD – klasické znázornění zeleně pro doporučenou vertikální rychlost a červeně pro nedoporučenou vertikální rychlost.

**Zvukový výstup** je proveden pomocí reproduktoru, skrze který jsou provedena všechna akustická upozornění. V některých provedeních jsou tato upozornění také prezentována prostřednictvím sluchátek. Žádná zvuková upozornění nejsou generována pod výškou 500 ft  $\pm$ 100 ft nad zemí nebo v případě generování upozornění jiného systému s vyšší prioritou (například signalizace přetažení).

Možná generovaná upozornění ve směru stoupání (Pešout) – tab. 3

Směr stoupání		
Rada k vyhnutí	Požadovaná vertikální rychlost	Upozornění
Climb	1500 ft/min	Climb, Climb
Crossing climb	1500 ft/min	Climb, crossing climb; climb, crossing climb
Maintain climb <sub>1</sub>	1500 – 4400 ft/min	Maintain vertical speed, maintain
Maintain crossing climb <sub>1</sub>	1500 – 4400 ft/min	Maintain vertical speed, crossing maintain
Level off	0 ft/min	Level off, level off
Reversal climb <sub>2</sub>	1500 ft/min	Climb, climb NOW; climb, climb NOW
Increase climb <sub>2</sub>	2500 ft/min	Increase climb, Increase climb
Preventivní rada	žádná změna	Monitor vertical speed
Rada ukončena	-----	Clear of conflict

Uvádím zde v tabulkách standardní zvuková upozornění, která může protisrážkový systém TCAS II na palubě generovat. V prvním sloupci je význam upozornění, ve druhém doporučená vertikální rychlost a ve třetím je uvedena fráze, která bude akusticky prezentována posádce. Přehled upozornění je uveden ve dvou tabulkách a je rozdělený podle smyslu upozornění na stoupání a klesání, jelikož vzhledem k velikosti tabulky nelze tyto parametry uvést v jedné sdružené tabulce. Tabulka uvedená výše se týká upozornění na stoupání, tabulka níže se věnuje upozorněním pro klesání. Pro obě tabulky platí legenda 1 – toto upozornění může být vyvoláno jen za předpokladu, že letadlo již stoupá nebo klesá ve správném směru více než 1500 ft/min. Pro index 2 platí, že toto upozornění není vydáváno jako počáteční rada.



Možná generovaná upozornění ve směru klesání (Pešout) – tab. 4

Směr klesání		
Rada k vyhnutí	Požadovaná vertikální rychlost	Upozornění
Descent	-1500 ft/min	Descent, descent
Crossing descent	-1500 ft/min	Descent, crossing descent descent, crossing descent
Maintain descent <sub>1</sub>	-1500 – 4400 ft/min	Maintain vertical speed, maintain
Maintain Crossing descent <sub>1</sub>	-1500 – 4400 ft/min	Maintain vertical speed, crossing maintain
Level off	0 ft/min	Level off, level off
Reversal descent <sub>2</sub>	-1500 ft/min	Descent, descent NOW descent, descent NOW
Increase descent <sub>2</sub>	-2500 ft/min	Increase descent increase descent
Preventivní rada	žádná změna	Monitor vertical speed
Rada ukončena	-----	Clear of conflict

## 4.2. Omezení sledování cílů

Funkce sledování cílů obsahuje mechanismus sloužící k omezení ovlivňování elektromagnetického záření ve spektru frekvencí 1030/1090 MHz. Každá jednotka TCAS II je navržena tak, aby omezila své vlastní vysílání. Protisrážkový systém je schopen určit počet TCAS jednotek v jeho dosahu prostřednictvím zprávy „TCAS presence“, jež je automaticky vysílána každou jednotkou v intervalu 1x za 8 sekund. Zpráva obsahuje 24 bitovou adresu odesílatele. Poté, co počet protisrážkových systémů v dosahu vzroste, množství a intenzita vysílaných dotazů je snížena.

Pokud se vlastní letadlo nachází v letové hladině 180 a níže, změní se interval vysílaných dotazů pro letouny, které nejsou vyhodnoceny jako hrozba (nevytvoří konflikt v následujících 60 sekundách) a zároveň jsou ve vzdálenosti větší než 3 NM, na 1 dotaz za 5 sekund namísto 1 dotaz za 1 sekundu. Tento mechanismus se nazývá „reduced surveillance“.

Účelem snížení této frekvence dotazování je zabránit přetížení palubního odpovídače. K tomu může dojít v blízkosti letišť s hustým provozem vzhledem ke zvýšené frekvenci dotazování a vysílání odpovědí ostatním TCAS jednotkám. V důsledku toho může dojít v prostoru s velmi hustým provozem ke snížení dosahu sledovaných letadel protisrážkovým systémem až na vzdálenost pouhých 5 NM oproti standardní vzdálenosti 30 NM pro letouny vybavené odpovídačem módu S.

### **4.3. Funkce hybridního sledování**

Novou funkcí pro TCAS II verze 7.1 je režim hybridního sledování, jehož účelem je redukovat množství vysílaných dotazů a následně odpovědí módu S. Podmínkou pro tuto funkci je vybavení odpovídačem módu S extended squitter, což je ADS-B technologie vysílající na frekvenci 1090 MHz (také s názvem 1090ES). Standardy pro hybridní sledování jsou publikovány RTCA v dokumentu DO-300.

Podle nařízení Evropské komise č. 1207/2011 musí být všechny civilní letouny IFR/GAT (general air transport) s maximální certifikovanou vzletovou hmotností více než 5700 kg nebo maximální cestovní vzdušnou rychlost více než 250 uzlů vybaveny odpovídačem módu S s funkcí Enhanced Surveillance a ADS-B 1090 MHz Extended Squitter (ES) od data:

- 8. června 2016 pro všechny letouny, jimž bylo vydáno osvědčení o letové způsobilosti 8. června 2016 a později
- 7. června 2020 pro letouny, jimž bylo vydáno osvědčení o letové způsobilosti před 8. červnem 2016.

Technologie pracuje na principu pasivního sledování vysílání z odpovídače 1090ES (na základě 24 bitové adresy). Ten vysílá několik parametrů, jeden z nich je údaj o vlastní poloze získaný z palubního navigačního zařízení (GNSS). V případě aktivního sledování cíle vysílá TCAS II dotazy na okolní provoz a z jejich odpovědí získá vzdálenost, směrové zaměření a výšku a dochází k pravidelnému vysílání dotazů. V případě této pasivní technologie vlastní protisrážkový systém po přijetí vysílání 1090ES (obsahující polohu) aktivním dotazem ověří, zda oznámená poloha odpovídá poloze získané aktivním dotazem. Pokud jsou oznámené souřadnice vyhodnoceny jako neplatné, nebude vlastní letoun využívat žádná přijatá data přes

1090ES a nebude s tímto letounem docházet k pasivnímu sledování. Veškerá další interakce bude probíhat pouze na základě aktivního dotazování. Pokud odpovídač narušitele při aktivním dotazování neodpoví, bude jako jediný údaj z vysílání 1090ES využita hlášená výška, jelikož zdroj této veličiny je stejný pro aktivní i pasivní sledování.

Pokud se porovnání přijaté a změřené polohy narušitele shoduje, bude nadále sledován pasivně s využitím oznamovaných veličin. V případě, že jeden ze dvou ověřovacích kroků protisrážkové logiky selže (rozstup výškový nebo vzdálenostní), je ověřována poloha narušitele aktivním dotazem jedenkrát za deset sekund. Pokud selžou oba ověřovací kroky a je vydána zpráva o upozornění na provoz nebo rada k vyhnutí, přechází systém automaticky na aktivní dotazování v intervalu jedenkrát za sekundu. Primární výhodou nižší frekvence aktivního dotazování tak přináší funkce hybridního sledování pouze v situaci, kdy si letouny navzájem nevytvářejí riziko sblížení.

#### **4.4. TCAS II a jeho omezení**

Omezení protisrážkového systému TCAS II plyne z jeho principu činnosti. Správná funkčnost je plně závislá na palubním odpovídači. Pokud okolní letouny nejsou vybaveny odpovídačem či jsou vybaveny odpovídačem, který je z technických důvodů neprovozní, nebo je odpovídač provozuschopný, ale jeho 24 bitová adresa je nesprávně naprogramována, stávají se tak nedetekovatelnými narušiteli pro TCAS II. Pokud je provozuschopný odpovídač detekován, ale neoznamuje svou výšku, není protisrážkový systém schopen vydat radu k vyhnutí. Pokud narušitel oznamuje svou výšku s vertikální rychlostí vyšší než 10 000 ft/min, nebude žádný TCAS II generovat zprávu upozornění na provoz ani radu k vyhnutí.

V tabulce níže je shrnuta úroveň ochrany protisrážkového systému TCAS II v závislosti na provozuschopném palubním vybavení narušitele v době sblížení. Levý sloupec prezentuje narušitele s různým palubním vybavením, zatímco pravý sloupec představuje vlastní letoun vybavený zařízením TCAS II a odpovídačem módu S.

Úroveň ochrany TCAS II (Pešout) – tab. 5

Vybavení narušitele	Vlastní letadlo
Žádný odpovídač	Nedetekováno
Pouze mód A	Nedetekováno
Mód A/C bez hlášení výšky	Pouze TA
Mód C nebo mód S	TA/RA
TCAS II	TA/koordinované RA

Pokud dojde k přerušení spojení mezi protisrážkovým systémem a odpovídačem nebo barometrickým výškoměrem, přestane TCAS automaticky pracovat. Pokud dojde k přerušení spojení s radiovým výškoměrem, zůstane TCAS provozuschopný, ale pouze v SL3 a výše (úroveň citlivosti, viz výše). Navíc nebude dostupná funkce utlumení upozornění v určité výšce nad zemí (například negenerování rady k vyhnutí se smyslem klesání pod 1550 ft nad zemí, popsáno výše).

#### 4.5. Vliv na bezpečnost

Přínos pro bezpečnost letecké dopravy protisrážkového systému se zpravidla vyjadřuje jako risk ratio, což je veličina porovnávající riziko srážky letounů vybavených zařízeními TCAS a letounů bez tohoto vybavení. Risk ratio 0% popisuje ideální systém, kde neexistuje žádné riziko, zatímco opačná hodnota risk ratio 100% indikuje neefektivní systém, kde vliv tohoto protisrážkového systému na bezpečnost je nulový. Skutečné hodnoty se pohybují mezi těmito dvěma extrémy. Nejedná se tedy o veličinu popisující absolutní hodnotu bezpečnosti, nýbrž o relativní hodnotu popisující vliv zařízení TCAS na bezpečnost.

Pro vyjádření hodnoty risk ratio je nutné zohlednit následující:

- riziko nevyřešené srážky – pokud TCAS není schopen zabránit srážce
- riziko indukované srážky – pokud neexistuje riziko srážky, ale je indukováno zařízením TCAS.

Podle studie „Safety Benefit of ACAS II“ je riziko v evropském vzdušném prostoru zhruba pětinašobně sníženo přítomností protisrážkového systému TCAS. Studie dále uvádí, že risk ratio v prostoru s konvenčními minimy vertikálních rozstupů

(CVSM – conventional vertical separation minimum) je 21,7% a v prostoru snížení minim vertikálních rozstupů (RVSM – reduced vertical separation minima) je risk ratio 21,5%.

Riziko srážky je možné snížit kromě jiných faktorů úrovní palubního vybavení letadel, správnou a také včasnou reakcí posádky na radu k vyhnutí. Podle „Final Report on Studies on the Safety of ACAS II in Europe“ lze snížit riziko srážky letadel bez ohledu na TCAS vybavení narušitelů více než trojnásobně instalací protisrážkového zařízení TCAS na palubu vlastního letadla.

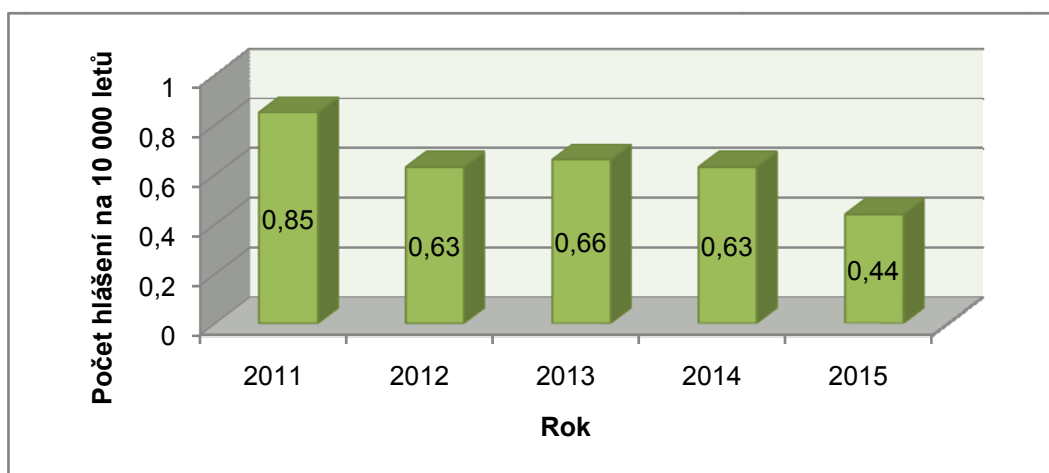
Podle Eurocontrolu lze z vyhodnocených dat a několika studií dojít k závěru, že TCAS přináší zvýšení bezpečnosti letového provozu. Tvrdí, že v mnoha případech následování rady k vyhnutí odvrátilo srážku či sblížení letadel, ale zároveň dodává, že TCAS nemůže úspěšně vyřešit každé sblížení letadel a také může v některých případech způsobit indukovanou srážku letadel.

#### **4.5.1. Výskyt manuálně oznamované rady k vyhnutí**

Z dlouhodobých statistik a vyhodnocení dat od provozovatelů určil Eurocontrol interval generování rady k vyhnutí. Každých přibližně 1000 letových hodin na krátkých a středně dlouhých tratích dojde k vygenerování rady k vyhnutí. Pro dálkové lety se interval navyšuje na zhruba každých 3000 letových hodin.

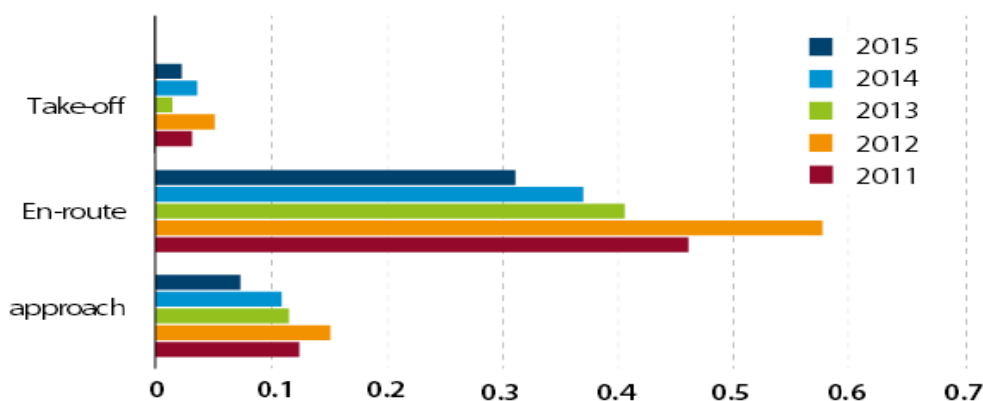
Většina výskytů sblížení s následkem generování rady k vyhnutí je hlášena od provozovatelů nebo skrze ohlašovací systém poskytovatelů služeb řízení letového provozu. Neexistují však žádné rozsáhlé statistiky evidující tyto výskyty v evropském vzdušném prostoru. Oproti tomu existuje projekt EVAIR spadající pod Eurocontrol, který sbírá a analyzuje data z radarů módu S a také z jiných zdrojů (například od posádek nebo složek řízení letového provozu). Při sběru dat oznamovaných manuálně od jiných subjektů nelze zajistit, že byly oznámeny veškeré požadované výskyty událostí, a při automatickém sběru dat z radarů módu S lze tato data objektivně vyhodnotit, ovšem tímto typem radaru není vybavena každá evropská země a hlášení tak nepokrývají oblast celé Evropy.

Následující statistické hodnoty čerpám prostřednictvím projektu EVAIR, který se věnuje evropskému vzdušnému prostoru a zveřejňuje statistiky v publikacích „Safety Bulletin“. První část bude čerpat ze souhrnu manuálních hlášení provozovatelů a poskytovatelů služeb řízení letového provozu. V níže přiloženém grafu je zobrazen souhrn ohlášených výskytů rad k vyhnutí v jednotlivých letech 2011 – 2015 vyjádřených v počtu hlášení na 10 000 letů vycházejících z EVAIR safety bulletinu č. 17. Z grafu vyplývá, že od roku 2013 do roku 2015 klesá počet hlášených výskytů rad k vyhnutí.



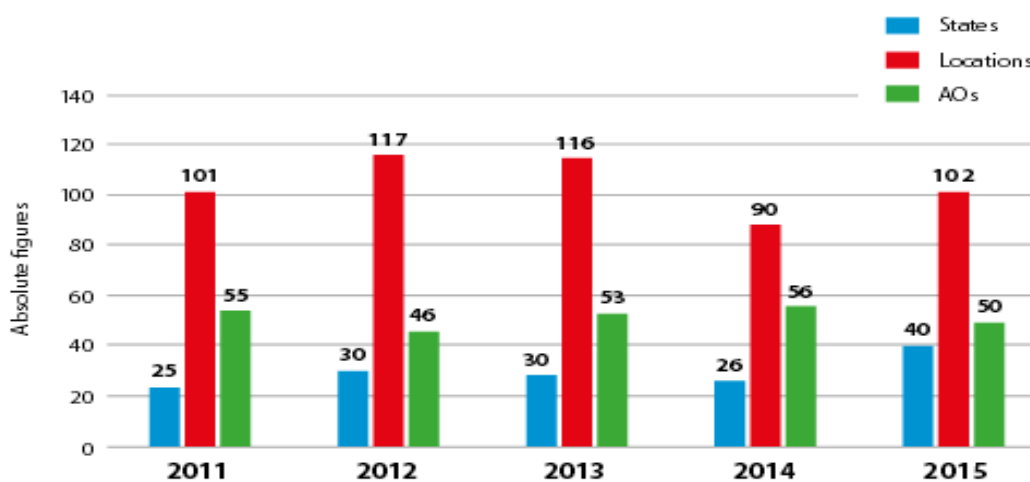
Počet hlášených rad k vyhnutí (Pešout) – graf 1

Další graf znázorňuje rozdělení těchto hlášených událostí rozdělených podle jednotlivých fází letu. Lze vyčíst závěr, že největší počet událostí se vyskytuje v běžném hladinovém letu. Tato fáze letu několikanásobně převyšuje hlášené výskytů rad k vyhnutí v ostatních fázích letu. Například na rok 2015 vychází, že 73% hlášení výskytu událostí bylo během traťového letu v porovnání s fází letu vzlet a přiblížení na přistání. Ovšem podle statistik dochází na některých rušných letištích k mnohem většímu výskytu událostí ve fázi přiblížení, než ve fázi traťového letu.



Rady k vyhnutí během fází letu (EVAIR safety bulletin č. 17) – graf 2

Graf níže zachycuje výskyty rozdělené do tří kategorií. Modrou barvou je znázorněn počet zemí (states), ve kterých se hlášené události odehrály, červená barva znázorňuje počet míst (locations), na kterých k výskytu došlo, a tento atribut není blíže specifikován. Zelená barva vyjadřuje počet provozovatelů (AOs), jejichž letoun figuroval ve výskytu události. Pohledem na znázorněná data lze dojít k závěru, že i přes celkový pokles hlášených událostí mezi lety 2014 a 2015 došlo v roce 2015 k nárůstu jednak počtu zemí a jednak počtu míst, ve kterých byly výskyty rad k vyhnutí oznámeny. Naopak mezi zmíněnými roky si lze všimnout poklesu o 11% v počtu leteckých provozovatelů, kteří jsou zahrnuti ve výskytu rad k vyhnutí.

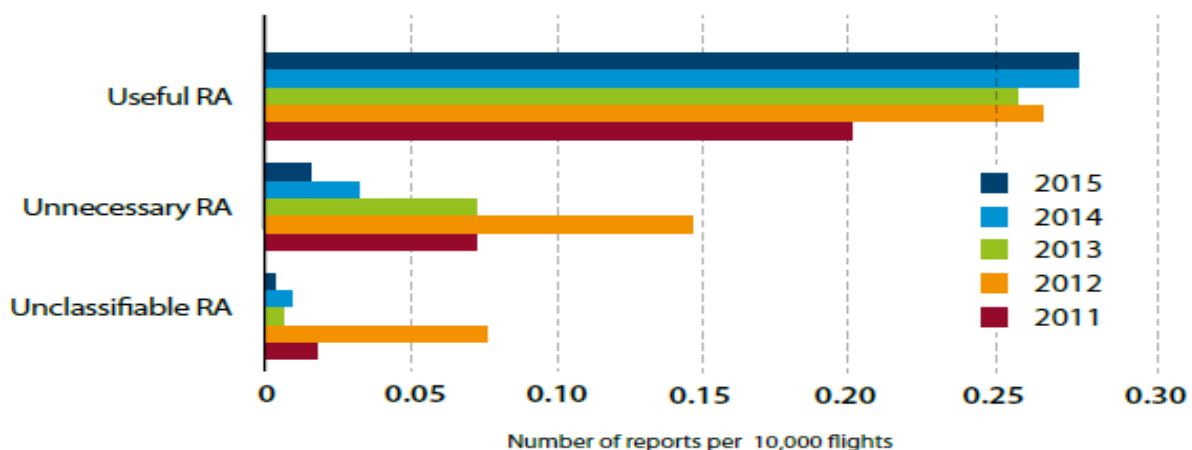


Rozdělení rad k vyhnutí podle legendy (EVAIR safety bulletin č. 17) – graf 3

Následuje grafické znázornění rozdělení typů rad k vyhnutí podle ICAO. Hlášení jsou rozdělena do tří kategorií:

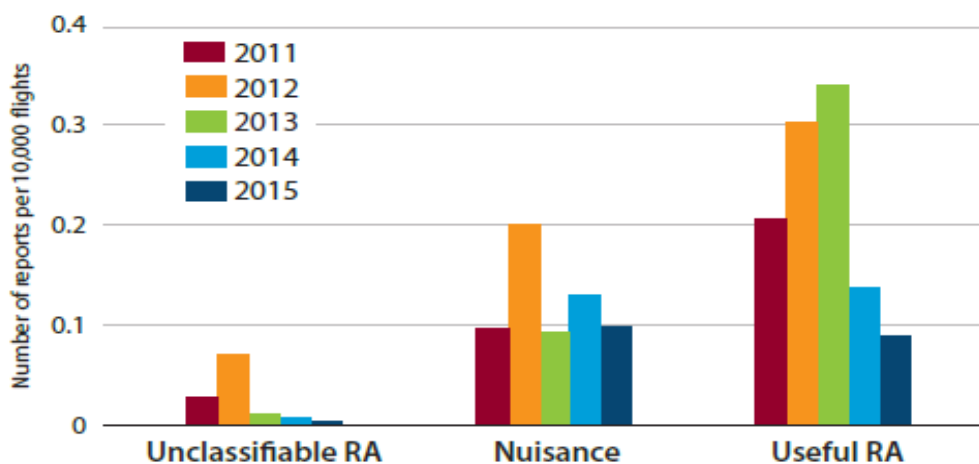
- Useful RA – rada byla vygenerována v situaci, kde existovalo riziko srážky
- Unnecessary RA (Nuisance) – rada k vyhnutí byla vygenerována v momentě, kdy neexistovalo riziko srážky
- Unclassifiable RA – v důsledku nedostatečných rad nelze klasifikovat.

Z grafu lze identifikovat zpravidla několikanásobnou převahu užitečných rad k vyhnutí v porovnání s těmi nežádoucími a od roku 2012 trvalý pokles nežádoucích rad k vyhnutí.



Rozdělení typů rad k vyhnutí (EVAIR safety bulletin č. 17) – graf 4

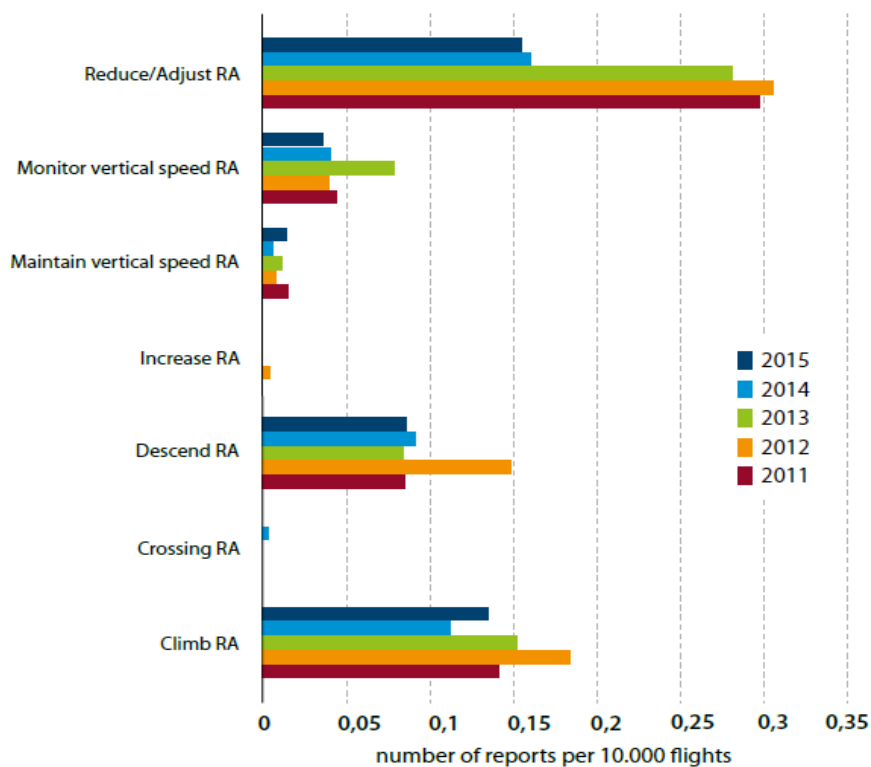
Pro ilustraci uvádím také graf znázorňující stejné rozdělení, ovšem pouze pro letní sezóny 2011 – 2015 (období od 1. dubna do 30. září). Zde je patrná změna v poměru nežádoucích a užitečných rad k vyhnutí. V roce 2014 je rozdíl mezi těmito typy téměř zanedbatelný, kdy užitečných rad bylo jen nepatrně více. O rok později dokonce došlo k obrácení poměrů, nežádoucích rad k vyhnutí bylo více než rad užitečných. Tento jev byl zaznamenán poprvé od doby sběru dat o zařízení TCAS společností Eurocontrol. Vzhledem k tomu, že jsou tato data manuálně oznamována, věří autoři vyhodnocující tyto statistiky, že je tento nepoměr způsoben rozhodnutím pilotů oznamovat spíše negativní události. Důvěru pilotů dokládají autoři vyhodnocením nenásledovaných rad k vyhnutí (posádka nepostupuje podle vygenerované rady k vyhnutí), kdy v letní sezóně 2015 není zaznamenána žádná taková událost.



Rozdělení typů rad k vyhnutí - letní sezóna (EVAIR safety bulletin č. 16) – graf 5



Rozčlenění konkrétních rad k vyhnutí ukazuje nejvyšší podíl pro radu typu „adjust vertical speed“ respektive „level off“. Podle autorů je tato rada k vyhnutí generována nejčastěji při letu vysokou vertikální rychlostí a od roku 2012 je možné sledovat pokles těchto rad. Vidí to jako výsledek opakovaného apelu provozovatelů letecké dopravy a poskytovatelů služeb řízení letového provozu na posádky, aby zohledňovaly vertikální rychlost v blízkosti jiného provozu. Při porovnání roku 2014 a 2015 je z grafu níže čitelný nárůst rady „climb“ pro rok 2015.



Rozdělení konkrétních rad k vyhnutí (EVAIR safety bulletin č. 17) – graf 6

Podle tvrzení Eurocontrolu jejich složka „Network Manager Safety Unit“ zaznamenala výskyt falešných rad k vyhnutí (TCAS MOPS ED-143 definuje falešnou radu jako generování rady k vyhnutí na základě falešného signálu nebo v důsledku technické poruchy protisrážkového zařízení). Sdružujícím faktorem pro TCAS generující falešné rady je schopnost hybridního sledování a její výskyt byl zaznamenán pouze v souvislosti s letouny Airbus. Falešné rady k vyhnutí jsou generovány v situaci, kdy se dva letouny míjejí ve stejné výšce nebo při vertikální sbíhavosti, ale podmínky pro standardní vygenerování rady k vyhnutí nenastanou. Falešná rada je prezentována pouze na palubě jednoho letadla vzhledem ke druhému, které se nachází 5 – 7 NM za tímto letounem nebo letí rovnoběžně s ním. V období od prosince 2012 do listopadu 2016 je zaznamenáno 132 takových případů. V jednom z těchto případů

posádka nepostupovala podle vygenerované rady k vyhnutí. V ostatních případech posádky postupovaly podle rady a v jednom případě došlo ke snížení rozstupů mezi tímto letadlem a letadlem původně nezúčastněným.

Následující statistické hodnoty se vztahují k falešným radám k vyhnutí ve zmiňovaném časovém období. Průměrná vertikální odchylka od povolené hladiny byla 650 ft a maximální hodnota nabývá 3000 ft. V průměru rada k vyhnutí trvala 32 sekund a 75% falešných rad bylo generováno v traťovém letu, 10% ve stoupání a 15% v klesání. Nad letovou hladinou 360 se odehrálo 67% všech případů.

Z uvedených statistik vyplývá, že každoročně je nejvíce rad k vyhnutí vydáno ve fázi traťového letu s největším podílem pokynu ke změně vertikální rychlosti, jenž je nejčastěji způsoben vysokou vertikální rychlostí letadla. Přestože v ročních průměrech převažují užitečné rady k vyhnutí oproti nežádoucím, z letní sezóny roku 2015 vyplývá obrácený poměr. Nežádoucí rady zaujaly vyšší podíl, z čehož lze ve spojení s nejčastější příčinou vydávaných rad, tedy vysokou vertikální rychlostí předpokládat, že posádky hodnotí negativně rady na základě této příčiny.

#### 4.5.2. Výskyt automaticky oznámené rady k vyhnutí

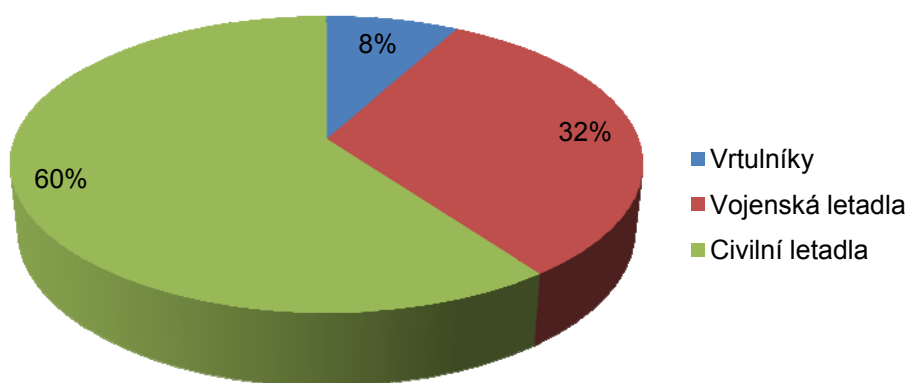
Následující statistiky za období 2011 – 2014 jsou získané pomocí nástroje ASMT (automated safety monitoring tool) a zveřejněné prostřednictvím stejných publikací projektu EVAIR jako v předchozím případě. ASMT získává a následně vyhodnocuje data týkající se vygenerovaných rad k vyhnutí z celkem 13 radarů módu S instalovaných na území Evropy. Autoři statistik uvádějí, že vzhledem k rozdílným počtům generovaných rad k vyhnutí každý rok jsou data uváděna v procentech, aby bylo možné tyto hodnoty porovnat.

Souhrn průměrů RA (Pešout) – tab. 5

Rok	Denní průměr RA	Měsíční průměr RA
2011	cca 2	cca 60
2012	2–3	cca 80
2013	cca 3	cca 90
2014	cca 3	cca 90

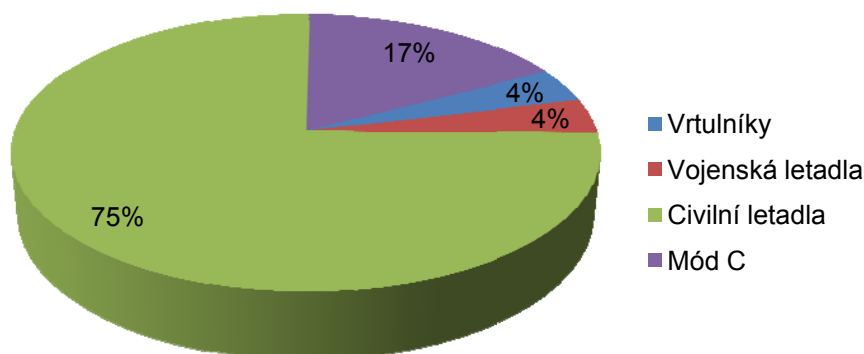
Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny průměry vydávání rad k vyhnutí a lze zde vyčíst jejich nárůst v roce 2013. To je způsobeno jednak zvýšením radarového pokrytí a jednak pravděpodobně zvýšením kvality zpráv automaticky vysílaných protisrážkovými systémy při generování rady k vyhnutí (snížení počtu porušených a tedy nepoužitelných zpráv).

U některých letadel došlo k zaregistrování opakovaných hlášení. Při vyhledávání podle 24 bitových adres bylo zjištěno, že v roce 2014 byla většina z těchto hlášení z vojenských letadel. Pro civilní letoun je generování rady k vyhnutí více než jedenkrát za rok výjimečné. Přestože pro vojenské letouny není povinnost kromě Německa mít na palubě protisrážkový systém TCAS, většina jím vybavena je.



Rozdělení podílu RA (Pešout) – graf 7

Graf výše znázorňuje rozdělení typů letadel, na jejichž palubách došlo k vygenerování rady k vyhnutí v roce 2014. Většina (60%) rad k vyhnutí byla vygenerována na palubách civilních letadel a v počtu 32% byly rady prezentovány posádkám vojenských letadel. Zbýlých 8% se týká helikoptér.

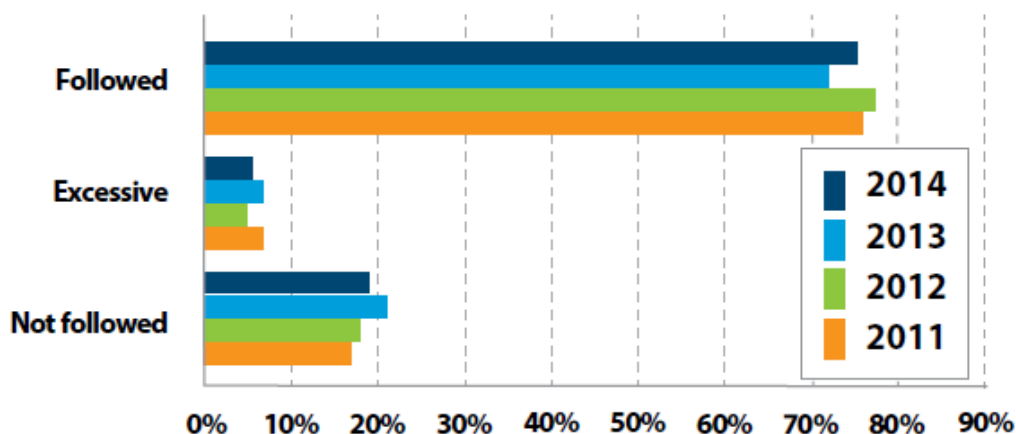


Rozdělení podílu narušitelů (Pešout) – graf 8

Tento graf ukazuje rozdělení typů letadel, které způsobily generování rady k vyhnutí na palubách civilních letadel. Tři čtvrtiny všech generovaných rad k vyhnutí byly způsobeny civilními letouny a 17% zaujaly neidentifikovatelné letouny s palubním odpovídáčem pouze v módu C.

Zajímavé hledisko získaných statistik je schopnost vyjádřit postupování posádky při generování rady k vyhnutí, tedy zda piloti postupují v souladu s radou, nebo nikoliv. Následující statisticky rozdělují výstup do tří kategorií:

- Followed – posádka následovala radu k vyhnutí správným postupem
- Excessive – posádka postupovala podle generované rady, avšak dosáhla příliš vysoké vertikální rychlosti
- Not followed – pilot pokračoval v letu neměnnou trajektorií nebo zahájil úhybný manévr příliš pomalu k dosažení požadované vertikální rychlosti.

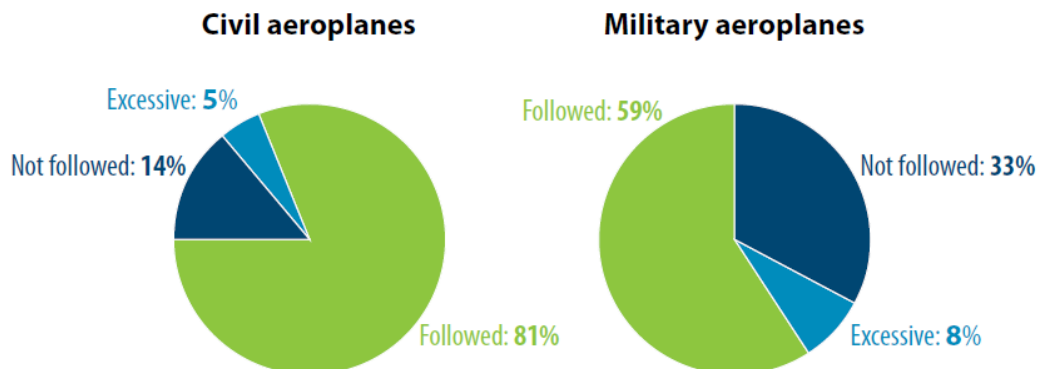


Postupování podle rady k vyhnutí (EVAIR safety bulletin č. 15) – graf 9

Z výše přiloženého grafu lze vyčíst poměry výše jmenovaných tří kategorií podle jednotlivých let (2011 – 2014) vyjádřených v procentech. Podíly se v průběhu čtyř let příliš nemění a podle rady k vyhnutí postupuje každý rok v průměru 75% posádek. Průměr blízký se 20% při nepostupování podle rady k vyhnutí je z velké části způsoben vojenskými letouny.

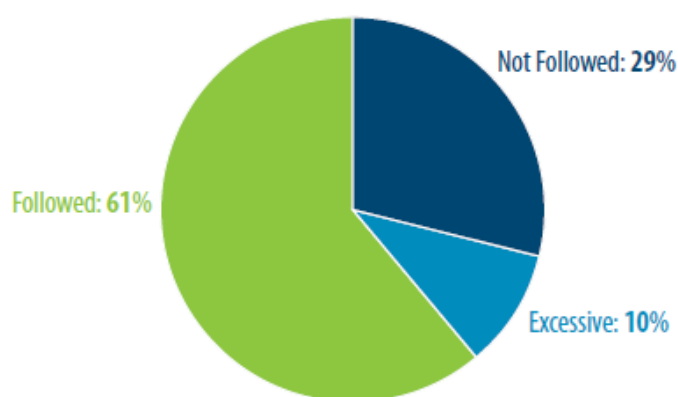
Poměr civilních a vojenských letadel je vyjádřen ve dvou níže přiložených grafech. Z posádek civilních letadel postupovalo v roce 2014 podle rad 81% a dalších 14% buďto na radu nereagovalo nebo postupovalo příliš pomalu. Oproti tomu vojenské posádky provedly úhybný manévr podle rady pouze v 59% případů,

zatímco v 41% případech nepostupovali piloti správně. Z toho bylo 33% případů v rozporu s generovanou radou k vyhnutí.



Postupování podle rady k vyhnutí civilní/vojenské letadla 2014 (EVAIR safety bulletin č. 15) – graf 10

Statistiky vyhodnocení se týká také reakcí posádek na sekundární rady k vyhnutí (secondary RA), což jsou jakékoliv rady k vyhnutí generované po první radě k vyhnutí. To může být například zeslabující rada nebo reverzní rada k vyhnutí. Statistické vyhodnocení se týká posádek civilních letadel v roce 2014. Z grafu lze identifikovat znatelný pokles posádek, které postupují v souladu s generovanou radou k vyhnutí na 61%. Z toho vyplývá nárůst pilotů nepostupujících podle rady na 29% a pilotů používajících příliš velké vertikální rychlosti při úhybných manévrech na 10%. Celkem tedy 39% zaznamenaných případů sekundárních úhybných manévrů v roce 2014 neproběhlo podle vygenerované rady k vyhnutí.



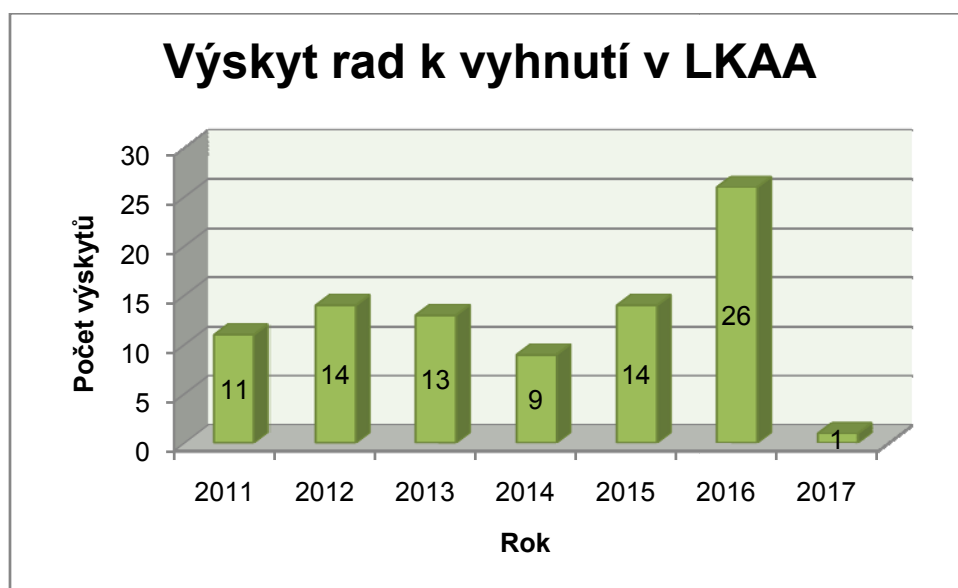
Sekundární rady k vyhnutí 2014 (EVAIR safety bulletin č. 15) – graf 11

Z automaticky oznamovaných rad vyplývá, že je udržován každoročně průměr přesahující 20% podílu rad k vyhnutí, jež posádky nenásledují správně. Piloti v těchto případech nezmění trajektorii, postupují ve smyslu vydané rady příliš pomalu

a nedosáhnou požadované vertikální rychlosti, postupují proti smyslu rady nebo dosáhnou příliš vysoké vertikální rychlosti. Také lze určit, že největší podíl vygenerovaných rad k vyhnutí je vydán na palubách civilních letadel a stejně tak zaujmají civilní letadla největší podíl narušitelů, kteří způsobují vydávání rad k vyhnutí.

### 4.5.3. Rady k vyhnutí v ČR

Provedl jsem rozbor oznámených výskytů rad k vyhnutí v letové informační oblasti Praha (FIR LKAA) za dostupné časové období 2011 – 2017. Data jsem získal z „Rozborů leteckých nehod a incidentů zveřejňovaných Ústavem pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod a hodnoty jsou rozděleny na jednotlivá čtvrtletí. Pro rok 2011 nebyla dostupná data za první čtvrtletí a pro rok 2017 jsou vzhledem k datu odevzdání této diplomové práce (květen) využita data jen za první čtvrtletí.



Graf výskytů rad k vyhnutí z dat UZPLN (Pešout) – graf 12

V období posledních třech čtvrtletí roku 2011 je zaznamenáno celkem 11 výskytů rad k vyhnutí, z čehož jsou všechny důsledkem příliš vysoké vertikální rychlosti stoupání či klesání. O rok později bylo ohlášeno 14 výskytů, z nichž 13 způsobila vysoká vertikální rychlost a 1 rada k vyhnutí byla generována letadlu na krátkém finále pro dráhu 30 na Ruzyňském letišti způsobenou vrtulníkem na vyčkávacím místě pro stejnou dráhu. Roku 2014 bylo oznámeno 9 rad, 7 z nich bylo důsledkem vysoké vertikální rychlosti a ve dvou případech nebyl narušitel identifikován. V roce 2015

bylo celkem 14 hlášených rad, přičemž u 9 z nich byla příčinou vysoká vertikální rychlost a v 5 případech nebyl narušitel identifikován. Rok 2016 zaznamenal strmý nárůst na počet 26, kdy ve 3 případech nebyl narušitel identifikován. Ve zbytku případů šlo o vysokou vertikální rychlost. V prvním čtvrtletí 2017 byl celkem 1 zaznamenaný případ způsoben vysokou vertikální rychlostí.

Z těchto výstupů lze konstatovat, že od roku 2014 do roku 2016 je zaznamenán plynulý nárůst výskytů rad k vyhnutí. Ze zveřejněných statistik lze také dovodit závěr, že většina rad k vyhnutí je generována na základě příliš vysoké vertikální rychlosti letadla, kterou posádka nepřizpůsobí blízkému provozu.

#### **4.6. Výcvik posádek k obsluze protisrážkového systému**

Výcvik je podle L-8168 rozdělen do kategorií: ACAS teoretický výcvik, ACAS výcvik manévrů, ACAS počáteční hodnocení, a ACAS opakovací výcvik.

Výcvik je také rozdělen do dvou typů položek: základní a vhodné. Položky spadající do kategorie základní jsou požadovány po každém provozovateli. Předpis též stanovuje konkrétní cíle a přijatelná kritéria výkonnosti. ACAS výcvik manévrů je považován za základní položku.

**Teoretický výcvik ACAS** se skládá z nabytí teoretických znalostí, jejichž výuka je zakončena písemným přezkoušením. Následující část zahrnuje základní položky:

##### **1) Provozní teorie**

- a) Provoz systému** – cílem je prokázat znalosti principu zařízení ACAS
- b) Prahové úrovně vydávání rad** – cílem je prokázat znalosti kritérií pro vydávání zpráv upozornění na provoz a rad k vyhnutí
- c) Omezení ACAS** – cílem je ověření znalostí o omezení ACAS
- d) Tlumení ACAS** – podmínky, za kterých jsou funkce ACAS tlumeny.

##### **2) Provozní postupy**

- a) Použití ovladačů** – použití ovladačů ACAS a obrazovky
- b) Interpretace zobrazení** – pochopení všech informací, které mohou být indikovány

- c) Použití pouze módu TA – znalost odpovídajících časů pro výběr pouze módu TA a omezení přidružená k použití tohoto módu
- d) Koordinace posádky – ověření, že pilot poučil další členy posádky, jak zacházet s radami ACAS
- e) Požadovaná hlášení – znalost požadavků na hlášení rad k vyhnutí řídicímu letového provozu a dalším leteckým úřadům.

Po předchozím výčtu základních položek následuje vhodná položka, do které patří prahové úrovně pro vydávání rad. Cílem je prokázání kritérií pro vydávání TA, RA.

**Výcvik manévrů ACAS** by měl probíhat na simulátoru; pokud k němu provozovatel nemá přístup, může být počáteční vyhodnocení ACAS provedeno přes interaktivní CBT, kde bude zobrazení obdobné letounu, na kterém bude pilot létat. Výcvik zahrnuje:

- a) reakce na TA – ověření, zda pilot řádně interpretuje a odpovídá na TA
- b) reakce na RA – ověření, zda pilot řádně interpretuje a odpovídá na RA.

**Počáteční vyhodnocení ACAS** zahrnuje vyhodnocení pochopení položek teoretického výcviku. Lze jej provést formou psaného testu nebo interaktivním CBT, který zaznamená správné a nesprávné odpovědi na otázky. Vyhodnocení, jak byly pochopeny jednotlivé položky při výcviku manévrů, by mělo být provedeno na letovém simulátoru instruktorem, inspektorem nebo ověřovacím pilotem. Pokud provozovatel nemá přístup k simulátoru vybavenému zařízením ACAS, lze vyhodnocení provést skrze CBT, jenž bude zaznamenávat správnost reakcí.

**Opakovací výcvik ACAS** cílí k udržení odpovídajících znalostí a dovedností pilotů. Měl by být proveden ve spojení s jinými programy opakovacích výcviků. Hlavním bodem opakovacího výcviku je prodiskutování všech významných případů zaznamenaných provozovatelem. Obsahem by měl být teoretický výcvik i výcvik manévrů se zaměřením na významné případy zjištěné provozní zkušeností, systémových změn nebo zvláštních charakteristik (například zavedení nového letadla, zobrazovacích zařízení). Piloti by měli všechny situace absolvovat jedenkrát za čtyři roky, při použití CBT je interval snížen na dva roky.



## **5. Možnosti vývoje systému**

### **5.1. Úhybný manévr provedený autopilotem**

Z předchozí části této diplomové práce jsem vyhodnotil nedostatky v provozu protisrážkového systému TCAS, které bych chtěl svými návrhy minimalizovat, nebo dokonce eliminovat.

Ze statistik uvedených výše vyplývá fakt, že v průměru 20% případů vydání prvotní rady k vyhnutí není posádkami následováno správně. Pro případné sekundární rady k vyhnutí se tento poměr zvyšuje. V roce 2014 nebylo 39% vydaných sekundárních rad následovaných podle platných postupů. Tyto případy zahrnují let neměnnou trajektorií, ale také příliš pomalou změnu trajektorie a nedosažení požadované vertikální rychlosti, méně časté případy jsou reakce v opačném smyslu oproti generované radě k vyhnutí. Podle dat projektu EVAIR v roce 2014 byl celkový podíl opačných reakcí pro prvotní rady 8% k vyhnutí a 10% v případě sekundárních rad k vyhnutí. Pokud posádka reaguje úhybným manévrem do správného směru, ale získá příliš velkou vertikální rychlost, tedy vyšší, než požaduje protisrážkový systém, je to hodnoceno také jako špatný postup. Existuje zde riziko střetu s původně nezúčastněným letadlem, kterému může být v důsledku příliš vysoké vertikální rychlosti prvního letadla též vydána rada k vyhnutí.

Po vyhodnocení těchto dat navrhuji implementování funkce do autopilota, která by v případě vydání rady k vyhnutí automaticky postupovala podle ní, bez nutného zásahu posádky do řízení. Funkce by se automaticky přepnula do standby módu v momentě připnutí autopilota a zůstala by v tomto módu až do doby odpojení autopilota. Pokud by během této doby došlo k vydání rady k vyhnutí, autopilot deaktivuje současné módy (například pro udržování nastavené výšky), aktivuje nově implementovaný mód TCAS a provede úhybný manévr tak, jak požaduje protisrážkový systém. TCAS funkce autopilota by měla takto reagovat i na veškeré následné rady k vyhnutí, vyžadující snížení/zvýšení vertikální rychlosti nebo změnu smyslu úhybného manévru.

Následně po obnovení požadovaného rozstupu mezi letadly a zrušení vydané rady k vyhnutí oznámí protisrážkový systém „CLEAR OF CONFLICT“ a autopilot provede

návrat do nastavené výšky vertikální rychlostí ne vyšší než 1000ft/min. Limit vertikální rychlosti je tu z důvodu toho, aby nedošlo k vydání další rady k vyhnutí s letounem v blízkosti nastavené výšky. Příčný mód autopilota zůstává po celou dobu neměnný a letoun letí podle zadané trati. Povinností posádky bude v tomto případě monitorovat průběh úhybného manévru a ohlásit postupování podle rady k vyhnutí stejným způsobem jako doposud. Jedná se tedy o oznámení „TCAS RA“, případně „UNABLE, TCAS RA“ a po ukončení úhybného manévru „CLEAR OF CONFLICT“ viz výše.

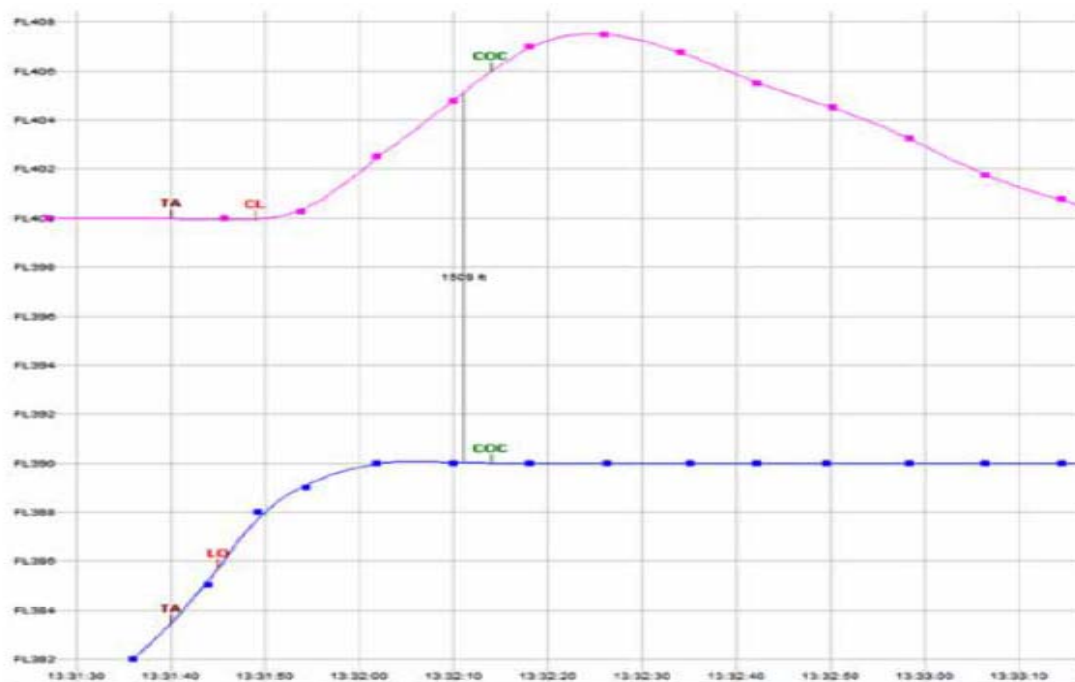
Při implementování této funkce autopilota na palubu všech letadel, vykonávajících obchodní leteckou dopravu dojde k eliminování špatných reakcí posádek na vydanou radu k vyhnutí. To ve svém důsledku povede ke snížení počtu vydaných rad, jelikož nebudou vznikat řetězové reakce, kdy je rada vydána i na palubě původně nezúčastněného letadla. Tato tvrzení ovšem platí pouze za předpokladu, že veškeré vydané rady budou následované za pomoci autopilota a že vše bude fungovat tak, jak je navrženo, tedy bez žádných poruch systému.

Nespornou výhodou automatické reakce na rady k vyhnutí je rychlost reakce. Posádka na prvotní radu k vyhnutí musí reagovat do 5 sekund a na každou následnou do 2,5 sekund. V případě použití této automatizace může být reakce téměř okamžitá. To může ve svém důsledku umožnit snížení času před bodem největšího sblížení (CPA), kdy je vydána rada k vyhnutí. To by v některých případech mohlo vést i k tomu, že nebude vydána zbytečná rada k vyhnutí, která je generována při současných časových intervalech například ve spojení s vysokou vertikální rychlostí narušitele. Snížení těchto časových limitů má svůj význam ovšem v případě, kdy je let prováděn na autopilota. Je nutné zachovat stávající dobu před bodem CPA, pokud letí pilot manuálně bez pomoci autopilota.

Automatické postupování podle rady k vyhnutí za pomoci autopilota je v současné době dostupné na palubách některých letounů Airbus, například A380 nebo A350. Autopilot postupuje podle vydané rady k vyhnutí. Pokud není v době generování rady připojen autopilot, je provedení úhybného manévru prezentováno posádce také prostřednictvím flight directora. Pokud bude pilot postupovat podle flight directora, provede stejný manévr, jaký by provedl aktivní autopilot a slouží tedy jako pomůcka

k tomu, aby pilot dosáhl požadované vertikální rychlosti a například jí zpočátku manévru nepřesáhl.

Dokument publikovaný Eurocae s označením ED-224 obsahuje poradní materiál pro implementování a testování automatických palubních letových systémů ve spojení s protisrážkovým systémem. Týká se zejména propojení autopilota a systému flight director se zařízením TCAS při vydání rady k vyhnutí.



Graf RA A380 (EVAIR safety bulletin č. 15) – graf 13

Nad tímto textem je přiložen graf vertikálního profilu letounu A380 a jeho narušitele v čase. Graf znázorňuje moment sblížení, kdy ve stejnou dobu došlo k vygenerování zprávy upozornění na provoz na palubách obou letadel. Narušitel znázorněný v grafu modrou křivkou stoupal vysokou vertikální rychlostí, a proto došlo k vygenerování rady k vyhnutí s pokynem „level off“, na kterou posádka reagovala až po intervalu 5 sekund. Z důvodu takto dlouhé doby nečinnosti došlo k vydání rady k vyhnutí „climb“ i na palubě letounu A380 znázorněného purpurovou křivkou, který je vybaven funkcí automatické reakce na vydanou radu k vyhnutí. Z grafu lze vyčíst reakční dobu automatického systému letounu A380 1–2 sekundy. Zhruba po 25 sekundách od vydání rady k vyhnutí následovala zpráva „clear of conflict“. Je zde

tedy zřejmé, že reakce automatického systému byla rychlejší než letadlo narušitel bez této automatizace a má smysl zavést tento systém plošně pro všechna letadla obchodní letecké dopravy.

## **5.2. Automatické snížení vertikální rychlosti**

Dalším nedostatkem vyplývajícím z předchozích kapitol, na který chci svým návrhem reagovat, je příliš velký počet vydaných rad k vyhnutí v důsledku vysoké vertikální rychlosti. Podle Eurocontrolu je velké množství generovaných rad způsobeno příliš vysokou vertikální rychlostí letadel při stoupání/klesání do povolené hladiny. Ze statistik výskytu rad k vyhnutí nad Evropou vyplývá, že většinu (zhruba 44%) počátečních rad k vyhnutí tvoří pokyn „ADJUST VERTICAL SPEED“ nebo „LEVEL OFF“. Z tohoto počtu bylo přibližně 70% rad generováno v situaci, kdy letadla dosahovala vertikálních rychlostí vyšších než 1500ft/min. Přestože platné postupy vyžadují snížení vertikální rychlosti (podle L-8168 na nejvýše 1500ft/min, podle provozních příruček některých evropských leteckých společností na 1000ft/min) při dosažení povolené výšky a přítomnosti okolního provozu, nejsou všechny posádky důsledné v jejich dodržování. Od pilotů taková situace vyžaduje manuální změnu módu autopilota a nastavení požadované hodnoty vertikální rychlosti.

Navrhuji proto funkci autopilota, který automaticky sníží vertikální rychlost letadla při přiblížování se do nastavené výšky. Kritériem pro tuto funkci je snížení vertikální rychlosti na hodnotu nejvýše 1000ft/min ve vzdálenosti 1000ft od nastavené výšky. Tato funkce má být podmíněna přítomností potencionálního konfliktního provozu. Pokud by byla tato funkce aplikována vždy 1000ft před nastavenou výškou, nemělo by to žádný přínos.

Nastavení aktivace pro snížení vertikální rychlosti autopilotem navrhuji následovně: pokud procesor protisrážkového systému vyhodnotí narušitele tak, že by vlastnímu letadlu před dosažením nastavené výšky byla vydána zpráva upozornění na provoz (TA), sníží vertikální rychlost. Poté může dojít k určení potřebné vertikální rychlosti tak, aby letoun dosáhl nastavené výšky těsně nad limitem pro generování upozornění na provoz. Pokud budeme pro ilustraci pročitat s tím, že je TA

generováno zpravidla 20–48 sekund před bodem největšího sblížení (CPA), vypočítá protisrážkový systém takovou vertikální rychlost, aby v momentě dosažení nastavené výšky byl čas k bodu CPA 49 sekund a více. Jedná se jen o příklad, který je značně zkreslený, pouze na něm ilustruji svou představu nastavení systému. Základní myšlenkou je dosažení nastavené výšky bez vydání TA nebo dokonce RA.

Doplňkem k tomuto řešení je využití datové komunikace módu S. Pokud bude mít protisrážkový systém informaci o nastavené výšce narušitele, může ji porovnat s nastavenou výškou vlastního letadla a následně tuto informaci zohlednit pro případné vydání rady k vyhnutí. Pokud procesor dojde porovnáním hodnot k závěru, že je mezi nastavenými výškami rozdíl alespoň 1000ft, nedojde k vydání rady k vyhnutí.

Informaci o nastavené výšce narušitele může protisrážkový systém přijmout přes již existující vysílání odpovídačů módu S „Enhanced surveillance“. Ty vysílají nastavenou výšku s přiřazeným registrem BDS 40<sub>hex</sub> a stačí pouze tuto hodnotu přidat do souboru dat, která se při komunikaci dvou protisrážkových systémů vyměňují. Do tohoto souboru také navrhuji přidat informaci o stavu autopilota, zda je aktivní, či nikoliv a zda je aktivní podélný mód, který přivede letoun do nastavené výšky. Informace o stavu autopilota je nutná pro předpoklad, že se stoupání/klesání letadla opravdu zastaví v nastavené výšce. U manuálního letu nelze s jistotou předpokládat, že let bude v této výšce zastaven. Pro tuto funkci autopilota musí být splněny následující podmínky:

- rozdíl nastavených výšek je minimálně 1000ft
- u všech dotčených letadel je připnutý autopilot v módu, jenž dosáhne nastavené výšky.

Pokud jsou splněny předchozí podmínky, nebude vygenerována rada k vyhnutí pro žádné z těchto letadel, bez ohledu na vertikální rychlosti. V případě, že nedojde k úspěšné datové výměně všech potřebných dat, nebude funkce aktivní.

## **6. Předpoklad zavedení nových systémů do praxe**

V současné době probíhá vývoj systému ACAS X, který je považován za nástupce protisrážkového systému TCAS II. Nový protisrážkový systém bude svým návrhem reagovat na zjištěné nedostatky u současného typu a dojde též k implementaci různých vylepšení.

ACAS X bude dodáván ve čtyřech verzích oproti jediné verzi zařízení TCAS II.

- ACAS X<sub>A</sub> – toto je nástupce verze TCAS II se zachováním aktivního dotazování pro zjištění vzdálenosti narušitele
- ACAS X<sub>P</sub> – pracuje pouze na principu pasivního ADS-B sledování, určeno především pro letadla všeobecného letectví
- ACAS X<sub>O</sub> – navržen pro provoz, pro který není určena verze X<sub>A</sub>, kde by mohla vydávat velké množství falešných rad k vyhnutí (například postupy se sníženými rozstupy)
- ACAS X<sub>U</sub> – Určeno pro bezpilotní prostředky.

Jedním z nedostatků, na které bude ACAS X reagovat, jsou nežádoucí rady k vyhnutí. Ty jsou u verze TCAS II vydávány například při vysoké vertikální rychlosti, kdy je vzájemný rozstup letadel 1000ft. Evropský projekt SESAR (Single European Sky ATM Research) a NextGen se snaží o implementaci nového provozního konceptu, který umožní snížení rozstupu mezi letadly. TCAS II by ve své současné podobě nebyl schopen provozu v novém konceptu z výše uvedeného důvodu, a proto bylo nutné zahájit vývoj nového protisrážkového zařízení.

ACAS X bude používat logiku vyhýbání založenou na vyhledávání v numerické tabulce a optimalizovanou vzhledem k pravděpodobnostnímu modelu vzdušného prostoru a na souboru bezpečnostních a provozních okolností. Přínosem je zlepšení logiky vyhýbání, ale také náklady na zařízení v čase (například nízká frekvence aktualizací aj.). ACAS X bude navržen jako „plug-and-play“ koncept sledování, tedy bude umožněn vstup různých zdrojů pro určování polohy (satelitní, radarové, infračervené a elektro-optické systémy).

Zásadním rozdílem nového systému oproti stávajícímu bude logika vyhýbání a zdroje určování polohy. TCAS II využívá k určení polohy narušitele dotazování odpovídačů a pak případně vydá radu k vyhnutí na základě času k bodu největšího sblížení v kombinaci s přednastavenými pravidly.

ACAS X bude možné také instalovat na palubách letadel všeobecného letectví. Současný TCAS II může při vydávání rad k vyhnutí požadovat příliš vysoké vertikální rychlosti, kterých nejsou letadla všeobecného letectví schopna dosáhnout. Tento fakt bude v novém protisrážkovém systému zohledněn.

Zařízení také reaguje na současné možnosti určování polohy a bude využívat satelitní navigaci a technologii ADS-B. I přes implementaci hybridního sledování do současné verze protisrážkového systému nebudou schopnosti zařízení TCAS II vyhovovat požadavkům nového provozního konceptu. TCAS II lze přestavět tak, aby umožňoval použití v novém konceptu, avšak vzhledem k velké finanční náročnosti přestavby zařízení se americká FAA rozhodla k vývoji nového systému ACAS X. Ta financuje jeho vývoj a výzkum již od roku 2008.

Během přechodného období, kdy budou provozovatelé přecházet na tuto novou verzi, by neměly vznikat žádné komplikace. Provoz a ovládání bude stejné jako v případě zařízení TCAS II. Verze ACAS X<sub>A</sub>, která bude určena pro velká letadla v obchodní letecké dopravě, bude využívat stejný koordinační mechanismus. To by mělo zajistit bezproblémovou vzájemnou komunikaci těchto systémů.

Logika vyhýbání nového zařízení cílí na to, aby se snížil počet jednak počátečních, jednak následných vydaných rad k vyhnutí a v tomto důsledku může dojít k vydání rady k vyhnutí později, než v případě zařízení TCAS II. Změnou je také skutečnost, že zpráva o ukončení konfliktu může být generována ještě před dosažením bodu CPA v případě, že predikce trajektorií je uspokojivá. Podle Eurocontrolu dosahuje zařízení ACAS X v současném testování v americkém vzdušném prostoru snížení rizika kolize zhruba o 50%.

## **7. Závěr**

Provedl jsem vyhodnocení dostupných statistik věnujících se vydávaným radám k vyhnutí. Dostupné statistiky jsou rozdělené do dvou částí, z nichž obě jsou získány prostřednictvím projektu EVAIR společnosti Eurocontrol a týkají se evropského regionu. První část se skládá z dat získaných „manuálně“ oznámením od provozovatelů letecké dopravy či poskytovatele služeb řízení letového provozu. Druhá část vychází z dat získaných pouze od provozovatelů služeb řízení letového provozu „automaticky“ prostřednictvím radarů módů S. Data jsou shromážděna pomocí ASMT (automated safety monitoring tool) a dochází tak i k jejich vyhodnocení.

Na situaci vyplývající z těchto statistik jsem reagoval svými návrhy, o kterých se domnívám, že zlepší současnou situaci. Navrhl jsem automatické provedení úhybného manévru v souladu s vydanou radou k vyhnutí prostřednictvím autopilota. Díky této funkci dojde bez nutnosti zásahu posádky k zahájení úhybného manévru a následování rady k vyhnutí až do doby jejího ukončení, kdy provede letadlo návrat do původní nastavené výšky. Posádce zůstane povinnost monitorování průběhu manévru a nutnost informovat složky řízení letového provozu o odchýlení od povolené výšky. Touto funkcí autopilota reaguji na každoroční průměr zhruba 20% případů, kdy posádky nepostupují v souladu s vydanou radou k vyhnutí, čemuž lze implementací této funkce zabránit a která též může vést ke snížení doby reakce. V současné době musí piloti reagovat na prvotní radu k vyhnutí do doby 5 sekund a na každou následnou do doby 2,5 sekundy. To může vést také k možnosti snížení doby před bodem největšího sblížení (CPA), kdy je rada k vyhnutí vydávána.

Dalším návrhem reaguji na velké množství rad k vyhnutí v důsledku vysoké vertikální rychlosti. Mým návrhem je funkce autopilota automaticky snižující vertikální rychlost na nejvýše 1000ft/min ve vzdálenosti 1000ft od nastavené výšky, pokud se bude v blízkosti nacházet potencionální narušitel. Konkrétně definované podmínky této funkce jsou obsaženy v diplomové práci. Pokud by posádky vždy využívaly pro stoupání autopilota, vedla by navrhovaná funkce ke snížení vydávaných nežádoucích rad k vyhnutí a tím ke zvýšení plynulosti letového provozu.



Navrhuji též využití datové komunikace módu S. Protisrážkové systémy jsou prostřednictvím tohoto komunikačního kanálu schopny přijímat informace o nastavené výšce autopilota blízkých narušitelů. Pokud by docházelo k výměně této informace, mohli by ji protisrážkové systémy zohlednit. V případě, že protisrážkový systém vyhodnotí dostatečný rozstup mezi vlastní výškou a nastavenou výškou narušitele, nebude nutné vydávat radu k vyhnutí ani v případě vysoké vertikální rychlosti narušitele. Tento předpoklad ovšem platí pouze v případě, že bude posádka narušitele vykonávat let na autopilota. Informaci o připnutí autopilota a aktivních módech bude také vysílat odpovídač módu S. Pokud bude posádka narušitele vykonávat manuální let, nelze s jistotou předpokládat, že letadlo opravdu přejde do horizontálního letu v nastavené výšce a navrhovaná funkce nebude v tomto případě aktivní.

Dle mého názoru jsem splnil cíl práce, který jsem si zpočátku diplomové práce zvolil. Navrhl jsem určitá vylepšení, kterými jsem reagoval na některé ze zjištěných nedostatků protisrážkového systému TCAS. V případě implementování mých návrhů do reálného provozu může dojít ke zvýšení efektivity vydávání rad k vyhnutí a tím ke zvýšení plynulosti a bezpečnosti letového provozu.

## Seznam použitých zdrojů:

*Namibia crash* [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z:  
<http://edition.cnn.com/US/9712/12/us.c-141/>

WELCH, J. D. a V. A. ORLANDO. *Active Beacon Collision Avoidance System (BCAS) Functional Overview* [online]. **1980** [cit. 2017-04-10]. Dostupné z:  
[https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Welch\\_1980\\_ATC-102\\_WW-15318.pdf](https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Welch_1980_ATC-102_WW-15318.pdf)

*History & future of ACAS* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z:  
<http://www.eurocontrol.int/articles/history-future-airborne-collision-avoidance>

*Právo EU* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: [eur-lex.europa.eu](http://eur-lex.europa.eu)

*ACAS Guide* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z:  
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/safety/ACAS/safety-acas-ii-guide.pdf>

BURGES, Douglas, Sylvia ALTMAN a Loren WOOD. *TCAS: Maneuvering Aircraft in the Horizontal Plane. The Lincoln Laboratory Journal* [online]. **1994** [cit. 2017-04-15]. Dostupné z:  
[https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol07\\_no2/7.2.9.tcasmaneuvering.pdf](https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol07_no2/7.2.9.tcasmaneuvering.pdf)

*Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z:  
[https://www.icao.int/airnavigation/Lists/T\\_Documents/DispForm.aspx?ID=64&RootFolder=%2A](https://www.icao.int/airnavigation/Lists/T_Documents/DispForm.aspx?ID=64&RootFolder=%2A)

CP115 (LOLO) Evaluation Report. *SIRE+* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z:  
<http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/content/documents/nm/safety/ACAS/safety-acas-sire-cp115-lolo-evaluation-report-20070516.pdf>

BILLINGSLEY, T. B., L. P. ESPINDLE a J. D. GRIFFITH. *TCAS Multiple Threat Encounter Analysis* [online]. **2009** [cit. 2017-04-18]. Dostupné z:  
[https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Billingsley\\_2009\\_ATC-359\\_WW-18718.pdf](https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Billingsley_2009_ATC-359_WW-18718.pdf)

*7.0 & 7.1 TCAS* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z:  
<http://www.riment.com/2013/10/example-part/>

*Letecké předpisy ČR* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z:  
<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>

*AIP ČR* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z:  
[http://lis.rlp.cz/ais\\_data/www\\_main\\_control/frm\\_cz\\_aip.htm](http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm)

CHLUDZINSKI, B. *Lincoln Laboratory Evaluation of TCAS II Logic Version 7 – Volume I* [online]. 1999 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Chludzinski\\_1999\\_ATC-268i\\_WW-15318.pdf](https://www.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Chludzinski_1999_ATC-268i_WW-15318.pdf)

*Sekundární radiolokace* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: [https://board.fd.cvut.cz/files/ssr\\_v2.7\\_193.pdf](https://board.fd.cvut.cz/files/ssr_v2.7_193.pdf)

*A Novel Approach towards the Designing of an Antenna for Aircraft Collision Avoidance System* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>

*SKYbrary Aviation Safety* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Main\\_Page](https://www.skybrary.aero/index.php/Main_Page)

*Airborne and Ground-Based Safety Nets* [online]. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <https://www.qinetiq.com/services-products/c4isr/Pages/airborne-and-ground-based-safety-nets.aspx>

*Collision risk due to TCAS safety issues* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/safety/ACAS/safety-acas-collision-risk-due-to-tcas-safety-issues-20100510.pdf>

*EVAIR Safety Bulletin* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [http://publish.eurocontrol.int/publications?title=&field\\_term\\_publication\\_type\\_tid=238&year\[value\]\[year\]=](http://publish.eurocontrol.int/publications?title=&field_term_publication_type_tid=238&year[value][year]=)

Porady k bezpečnosti. *ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://uzpln.cz/porady-k-bezpecnosti>

*NETALERT - the Safety Nets newsletter: ACAS X* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/netalert-17.pdf>

## Seznam obrázků:

Obrázek 1	BCAS schéma
Obrázek 2	Horizontal miss distance filter
Obrázek 3	TCAS RA pro více narušitelů
Obrázek 4	Upozornění na provoz - TA
Obrázek 5	Rada k vyhnutí - RA
Obrázek 6	Graf maximální vzdálenosti pro generování upozornění
Obrázek 7	Ochranný prostor
Obrázek 8	Vyhodnocení směru rady k vyhnutí
Obrázek 9	Vyhodnocení intenzity rady k vyhnutí
Obrázek 10	TCAS II procesor ACSS a Rockwell Collins
Obrázek 11	Nesprávná reakce na radu k vyhnutí
Obrázek 12	Porovnání TCAS verze 7.0 a verze 7.1
Obrázek 13	TCAS II verze 7.0, nedostatečná reverzní logika
Obrázek 14	TCAS II verze 7.1, reverzní logika
Obrázek 15	TCAS II verze 7.1, zeslabující rada k vyhnutí
Obrázek 16	Vyzařovací diagram směrové a všesměrové antény
Obrázek 17	Schematické zobrazení TCAS II
Obrázek 18	Zobrazení cílů TCAS II

## Seznam tabulek:

Tabulka 1	Závislost úrovně citlivost na výšce
Tabulka 2	Omezení rad k vyhnutí
Tabulka 3	Možná generovaná upozornění ve směru stoupání
Tabulka 4	Možná generovaná upozornění ve směru klesání
Tabulka 5	Úroveň ochrany TCAS II

## Seznam použitých grafů:

Graf 1	Počet hlášených rad k vyhnutí
Graf 2	Rady k vyhnutí během fází letu
Graf 3	Rozdělení rad k vyhnutí podle legendy
Graf 4	Rozdělení typů rad k vyhnutí
Graf 5	Rozdělení typů rad k vyhnutí - letní sezóna
Graf 6	Rozdělení konkrétních rad k vyhnutí
Graf 7	Rozdělení podílu RA
Graf 8	Rozdělení podílu narušitelů
Graf 9	Postupování podle rady k vyhnutí
Graf 10	Postupování podle rady k vyhnutí civilní/vojenské letadla 2014
Graf 11	Sekundární rady k vyhnutí 2014
Graf 12	Graf výskytů rad k vyhnutí z dat UZPLN
Graf 13	Graf RA A380