

SIGURNOST ADS-B AVIO SISTEMA: ANALIZA LJUDSKIH FAKTORA

Apstrakt: *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS–B) je jedan od značajnih sistema, koji omogućava ostvarivanje sigurnijeg/bezbednijeg i efikasnijeg sistema vazdušnog prostora. Pored brojnih prednosti, kao što su jednostavna implementacija, jeftin hardver i velika tačnost pozicioniranja, ovaj bežični komunikacioni protokol ima i nekoliko veoma važnih nedostataka, a to su zavisnost od sistema satelitske navigacije (koji može biti fizički oštećen, korumpiran ili izložen interferencijama) i veoma jednostavan protokol, a koji ne obezbeđuje autentifikaciju i enkripciju. Tako, osim što su realne, pretnje po sajber bezbednost ADS-B sistema su i u konstantnom porastu. Pri svemu tome, veoma važan aspekt korišćenja ADS-B jeste ljudski faktor, a koji se u avijaciji najčešće odnosi na aspekte ljudske greške u avio-nesrećama i kvarovima avio sistema. Kako ADS-B obezbeđuje podatke iz kojih se mogu izvesti brojne napredne aplikacije, tako implementacija nove ADS-B opreme i procedura proširuje spektar pitanja u vezi sa ljudskim faktorom, kao što je razumevanje upotrebe automatizovanih on-board sistema, a koji postaju sve kompleksniji. Zbog toga je od velikog značaja analiza sigurnosti ADS-B sistema, tj. razmatranje potencijalnih opasnosti i analiziranje istih, primenom određenih metodoloških pristupa, kao što je Preliminary Hazard Analysis (PHA), tj. Preliminarna Analiza Opasnosti/Stabla Grešaka. Ovakav pristup bazira se na analizi opasnosti koje se identifikuju u preliminarnoj listi opasnosti i identifikaciji prethodno neprepoznatih opasnosti u ranoj fazi razvoja sistema, u cilju davanju preporuka za sprečavanje/ublažavanje identifikovanih opasnosti.*

Ključne reči: *ADS-B, civilna avijacija, ljudski faktor, preliminarna analiza opasnosti, sigurnost, bezbednost*

* Fakultet za civilno vazduhoplovstvo, Megatrend Univerzitet, Beograd, Srbija
E-mail: dejankozovic@gmail.com

** Fakultet za civilno vazduhoplovstvo, Megatrend Univerzitet, Beograd, Srbija
E-mail: ddjurdjevic@megatrend.edu.rs

1. UVOD

U težnji za postizanjem sve većih zahteva u vezi sa kapacitetom vazdušnog prostora, smanjenjem operativnih troškova, zagušenjem u avio-saobraćaju, ekološkim zahtevima, itd., uz istovremeni porast sigurnosti i bezbednosti, Federalna uprava za vazduhoplovstvo (FAA) i Evropska organizacija za bezbednost vazdušne plovidbe (EUROCONTROL) uvele su (NextGen)¹ i SESAR² programe, u cilju modernizacije *Air Traffic Management*-a (ATM)-a i poboljšanja slanja/prijema digitalnih informacija. Njihov integralni deo je razvoj *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast* (ADS-B), kao i potpuna integracija ovog navigacionog sistema u svrhu smanjenja zavisnosti avio-sistema od skupe i zastarele radarske opreme. Tako, ADS-B-u je dodeljen poseban ASTERIX (All Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange) protocol kategorije 21, za razmenu informacija u vazduhoplovstvu.

Transformišući sve segmente avijacije, ADS-B je danas preferirani metod nadzora, koji nudi brojne benefite i Kontrolu vazdušnog saobraćaja (ATC) i pilotima, kao što je značajan porast *situational awareness* letačke posade i efikasniju operativnost kontrolora letenja. Pored toga, u odnosu na tradicionalne radarske sisteme, ADS-B smanjuje troškove postavljanja i održavanja sistema, značajno povećavajući pokrivenost područja³.

Međutim, ADS-B sistem ima i određene slabosti – nedostatak integriteta i autentičnosti u emitovanim tekstualnim porukama, povećavaju ranjivost ovog sistema na različite vrste sajber-fizičkih napada. Iako se smatra da primena ADS-B ne dovodi do porasta bezbednosnog rizika po avio-sisteme, u kontekstu unapređenja komunikacije korišćenjem vazduhoplovnih mreža, uvođenjem COTS (*Commercial-Off-The-Shelf*) komponenata, kao i široka upotreba IoT uređaja⁴ (internet stvari), predstavljaju rizik po sajber bezbednost jer mogu dovesti do ugrožavanja integriteta/dostupnosti podataka. Sajber bezbednosne pretnje nisu samo pretpostavka, već su neke i realizovane. U radovima autora Kožovića⁵ i Đurđevića⁶, dat je pregled objavljenih sajber incidenata i potencijalnih ranjivosti avio sistema, kao i predočene slabosti različitih avio sistema (npr. *Global positioning system*, GPS, odnosno *Global Navigation Satellite System*, GNSS, *Instrument Landing System*,

¹ NextGen - *Next Generation Air Transportation System*.

² SESAR - *Single European Sky Air Traffic Management Research*.

³ FAA (2025): *Automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B)*.

⁴ Stevanović, D. M., Đurđević, D. (2016): "internet stvari, lična i materijalna bezbednost", *Bezbednost*, 3/2016, 113-128.

⁵ Kožović, D. (2023): *Multidisciplinarni aspekti sajber bezbednosti avio sistema ADS-B*, doktorska disertacija, Fakultet za civilno vazduhoplovstvo, Megatrend univerzitet, Beograd.

⁶ Kožović, D., Đurđević, D. (2019): "Sajber bezbednost u avijaciji", *Megatrend revija*, 16(2)/2019, 39-56.

ILS⁷ i *Traffic Alert and Collision Avoidance System*, TCAS), a koji mogu biti ugroženi lažiranjem, tj. spufingom podataka⁸, veoma opasnim oblikom sajber napada čiji je cilj produkcija lažnih informacija/poruka (pogrešna pozicija/vremensko određenje).

S druge strane, kako ADS-B oprema može imati različite interfejsne s pilotima (od jednostavnog, do upravljačkog interfejsa naprednih karakteristika), veoma važan aspekt implementacije ADS-B jeste ljudski faktor, tj. odnos između ADS-B sistema i korisnika (pilota ili kontrolora letenja), kao i uloga koju ljudski faktor ima u odbrani od sajber napada.

Svakako, upotreba automatizovanih sistema, kao što je ADS-B, i generalno, veštačke inteligencije (AI), tj. povećanje automatizacije i razmene podataka, uključujući sajber-fizičke sisteme, IoT i računarstvo u oblaku, otvaraju širok spektar pitanja/barijera, a koja su u vezi sa tehnologijom (komunikacija i prikupljanje podataka, sajber-fizička bezbednost, donošenje odluka pomoću adaptivnih/nedeterminističkih sistema, integracija ljudi i mašina, itd), sertifikacijom i regulacijom (pristup vazдушnom prostoru za bespilotne letelice, proces sertifikacije, ekvivalentan nivo bezbednosti, poverenje u adaptivne/nedeterminističke IA sisteme, itd.), kao i s pravnim i društvenim pitanjima. Svaka od barijera se preklapa sa jednom ili više drugih, a njihovo prevazilaženje ne može biti izolovano, već je uslovljeno i podržano uspešnim rešavanjem svake od identifikovanih pojedinačnih barijera. Na primer, primena naprednih tehnologija u civilnom vazduhoplovstvu uslovljena je adekvatno završenim procesom sertifikacije; slično tome, napredne tehnologije mogu biti sertifikovane, samo ukoliko postoje robusni procesi verifikacije, a koji podržavaju razvoj tehnologije i sertifikaciju.

2. ADS-B TEHNOLOGIJA – KRATKI PREGLED

Jedan od gigantskih koraka u modernizaciji i poboljšanju kvaliteta bazduhoplovnih operacija predstavljalo je uvođenje *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) – multiparametarskog sistema za nadzor, uvedenog od strane FAA i EASA (*European Union Aviation Safety Agency*). To je zavisan i kooperativan sistem za nadzor kod koga ADS-B transponder⁹ instaliran u avionu korišćenjem

⁷ Sathaye, H., Schepers, D., Ranganathan, A., Noubir, G. (2019): "Wireless attacks on aircraft instrument landing systems", in: *28th USENIX Security Symposium, August 14–16, 2019, Santa Clara, CA, USA*, 1-16.

⁸ Pierpaoli, P., Egerstedt, M., Rahmani, A. (2015): "Altering UAV flight path by threatening Collision", in: *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th (2015)*, IEEE, 4A4-1-4A4-10.

⁹ Transponder (XPDR, XPNDR, TPDR или TP) je prijemnik/predajnik u avionu koji generiše odgovor/signal, nakon određenog upita; upit i odgovor su na različitim frekvencijama (dodekuje ih Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva, ICAO). Avio transponderi

SatNav (*Satellite Navigation*) tehnologije (GPS/GNSS), periodično razmenjuje (prenosi i prima) važne informacije s ATC i drugim avionima u neposrednoj okolini. Dakle, suština funkcionisanja ADS-B sistema sadržana je njegovom akronimu: *Automatic* – periodično prenosi informacije bez ikakve kontrole, tj. učešća pilota/operatera, *Dependent* – prenosi informacije koje se odnose na poziciju i vektor brzine dobijene od GPS/FMS (*Flight Management System*) i navigacione avionike, *Surveillance* – obezbeđuje metod za određivanje trodimenzionalne pozicije i identifikaciju aviona, ili drugih prevoznih sredstava i *Broadcast* - prenosi informacije (identitet, položaj, brzina, itd.) koje su dostupne svima, a koji imaju odgovarajuću opremu za prijem.

ADS-B ima dve različite funkcije: ADS-B Out i ADS-B In. ADS-B Out omogućava emitovanje informacija o avionu, kao što su identifikacija aviona i pozicija u realnom vremenu, visina i brzina, tj. ADS-B Out automatski prenosi parametre leta iz aviona do ATC na Zemlji, kao i do drugih aviona u neposrednoj okolini. ADS-B In omogućava prijem informacija o saobraćaju i meteorološkim uslovima od drugih aviona u neposrednoj okolini, značajno poboljšavajući svest pilota o situaciji, obezbeđujući pristup skoro identičnim podacima kojima raspolaže ATC. ADS-B Out je zahtevani globalni standard od 2022. godine (finalna odluka FAA i EASA kojom je ADS-B obavezni standard u Americi, Australiji i Evropi), dok je ADS-B In opcionalna usluga. Svaki avion može imati i "Out" i "In" mogućnosti, u zavisnosti od vrste transpondera koji je instaliran u avionu. Iako se smatra da istovremena primena ADS-B In s drugim sistemima¹⁰ omogućava povećanje bezbednosti, efikasnosti i kapaciteta vazdušnog prostora, bolje upravljanje, kao i kontrolu nekih operacija u uslovima velike gustine vazdušnog saobraćaja (npr. integracije ADS-B In i *Trajectory-Based Operations*), ADS-B ostaje opcionalna usluga, primarno usled visokih troškova implementacije, specifičnih standarda opreme, kao i zahteva za kokpit.

Pored zavisnosti od navigacionog sistema (GPS je najšire korišćeni), ADS-B značajno zavisi i od vrste komunikacionih sistema. Koriste se tri vrste *data* linikova, tj. protokola: 1090-ES, UAT i VDL-M4, u zavisnosti od vrste vazduhoplova, a najčešće se koristi 1090-ES; ADS-B Out šalje poruke svake sekunde brzinom 1 Mbit/s preko 1090-ES ili UAT¹¹.

Svaka ADS-B poruka sadrži preambulu¹² (8 μ s) i 56-bitni (kratki) ili 112-bitni (prošireni) blok podataka, koji se prenose automatski (bez ispitivanja od strane

mogu biti različitog režima rada: *Mode A* (šalje identifikacioni kod), *Mode C* (omogućava kontroloru automatsko očitavanje visine i nivoa leta) i *Mode S* (uključuje *Mode A* i *Mode C* i daje automatsku identifikaciju i podatke o visini vazduhoplova, kao i statusu leta.

¹⁰ McLean D. (2003): "Operational Requirements for Fully Automatic Flight", *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, 75(6)/2003, 570–574.

¹¹ Pavić A., Lalić B., Đurđević M. (2014): Osnove ADS-B tehnologije i osmatranje područja Republike Srbije bez radarske pokrivenosti", *Zbornik radova Infoteh–Jahorina*, 13, 419–424.

¹² Preambula je inicijalni impuls (signal), koji se u mrežnim komunikacijama, koristi za sinhronizaciju vremena prenosa između dva ili više Sistema.

zemaljskih stanica) SSR transponderom (povezanim s različitim izvorom podataka). ADS-B poruke nisu enkriptovane (šifrovane): poslednja 24 bita uključuju proveru pariteta koja detektuje i ispravlja greške u prenosu poruka. Tako, zbog nedostatka enkripcije, kao i autentifikacije, ADS-B može biti meta različitih vrsta sajber napada, kao što su ometanje i uskraćivanje usluga, prislušivanje, ubacivanje/reprodukcija poruke, manipulacija porukama i lažiranje. Poslednje pomenuti, veoma je opasan¹³ – u napadu lažiranjem poruke (spufing napad) predajnik emituje lažne signale, tj. signale koji se razlikuju od autentičnih satelitskih signala, tako da vazduhoplov preko ADS-B šalje pogrešne informacije o svom položaju. Iako se smatra najteže izvodljivim, spufing ADS-B sistema (kao i GPS) postaje sve realnije, usled veoma brzog napretka jeftinih SDR (*Software Defined Radio*) platformi. S druge strane, porast upotrebe bezpilotnih letilica (*Unmanned Aerial Systems*, UAS/dronova) i GPS-a za njihovu navigaciju, otvara prostor za eventualnu primenu za izvođenje spufing napada iz vazduha u cilju otmice/distrikcije bezbednosti nadzora vazdušnog saobraćaja.

Iako avio sistem može biti izložen različitim vrstama sajber napada⁵, a potencijalno i spufingu, primenom različitih protiv-mera za sajber bezbednosnu zaštitu, kao što su metode koje se baziraju na algoritmima mašinskog učenja (npr. model dubokog učenja, tj. veštačka inteligencija¹⁴), ovi napadi mogu se značajno ublažiti. S druge strane, piloti, kao poslednja linija odbrane, osposobljeni su da detektuju i rešavaju različite operativne probleme. Ipak, zbog mogućih suptilnijih/naprednijih oblika sajber napada na sektor avijacije, različite organizacije, kao što su Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (ICAO), Radio-tehnička komisija za aeronautiku (RTCA) i Evropska organizacija za opremu civilnog vazduhoplovstva (EUROCAE), proaktivno se bave povećanjem robusnosti GPS/GNSS/ADS-B sistema na različite vrste sajber napada¹⁵. Na primer, aktuelni pravac u okviru RTCA i EUROCAE za povećanje bezbednosne sigurnosti GNSS-a na rizik od spufinga, jeste uvođenje novih zahteva za sertifikovanu avio opremu, tj. za otkrivanje lažnih GNSS signala, u cilju korišćenja alternativne navigacione opreme, bez značajnog smanjenja bezbednosti/sigurnosti.

¹³ Kožović, D., Đurđević, D. (2021): "Spufing u civilnoj avijaciji: Bezbednost i sigurnost GPS/GNSS i ADS-B sistema", *Megatrend revija*, 18(3)/2021, 281-306.

¹⁴ Ying X., Mazer J., Bernieri G., Conti M., Buschell L., Poovendran R. (2019): "Detecting ADS-B spoofing attacks using deep neural networks", in *Proceeding of the IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS2019)*, Washington D.C., USA, 9 p.

¹⁵ Hegarty C., Shallberg K., Walter T., Alexander K. (2018): "Spoofing detection for airborne GNSS equipment", in *Proceedings of 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, Florida, USA, 1350–1368.

3. IMPEMENTACIJA ADS-B: LJUDSKI FAKTOR

Uvođenje ADS-B aplikacija u vazduhoplovne operacije, obuhvata mnogobrojne aspekte, a jedan od veoma značajnih jeste aspekt integracije ljudi i mašina, tj. interakcije ljudi s automatizovanim *on-board* sistemima. Ovi sistemi postaju sve napredniji, kao i kompleksniji; viši nivoi automatizacije/autonomije zahtevaju dodatne softvere, procesore i senzore, a dodatne komunikacije, bežično povezivanje i opcije za zabavu putnika tokom leta doprinose složenosti ovih sistema. Zbog svega toga, od veoma velikog značaja je analiza i rešavanje bezbednosnih/sigurnosnih pitanja¹⁶.

Generalno, analiza ljudskog faktora odnosi se na razumevanje ljudskog ponašanja i ljudskih performansi. Primenjena na operacije u vazduhoplovstvu, ova analiza razmatra ljudske faktore u cilju optimizacije integracije ljudi i sistema, koje oni koriste ili u kojima rade, Ova optimizacija podrazumeva povećanje bezbednosti i performansi, tj. smanjenje pojava i uticaja ljudske greške u avio-sistemima i poboljšanje ljudskih performansi.

Dakle, veoma značajan aspekt korišćenja ADSB tehnologije jeste način na koji različiti korisnici (piloti, kontrolori i dispečari) mogu efikasno koristiti ADS-B podatke/informacije u okviru svojih relevantnih odgovornosti. Pored prihvatanja i korišćenja ADS-B tehnologije od strane pilota i kontrolora, to podrazumeva i izgradnju radne etike, tj. saradnje između pilota, kontrolora i sertifikovanih organa, kao i način delegiranja njihove uloge i odgovornosti u cilju bezbednog operativnog rada.

ADSB je veoma kompleksan sistem, koji obuhvata dva specifična podsistema, a koji su integrisani u kompletan ADS-B sistem: ADS-B In i ADS-B Out. Kompletan ADS-B sistem zavisi od drugih sistema, kao što su navigacioni i komunikacioni sistemi, sistemi operater/korisnik, itd. Dakle, mogu se identifikovati različite vrste/kategorije ranjivosti ovog sistema, između ostalih i opasnosti koje su prouzrokovane greškom pilota i kontrolora, kao i neadekvatnom komunikacijom između pilota i kontrolora. Pri tome, postoje brojne polazne tačke za ispitivanje uticaja ljudskog faktora, a jedna od njih je *Preliminary Hazard Analysis* (PHA)¹⁷, bazirana na *Fault Tree Analysis* (FTA)¹⁸.

Preliminary Hazard Analysis, jeste metodološki pristup analize sigurnosti, tj. alat koji se koristi za identifikaciju opasnosti, međusobno uslovljenih faktora

¹⁶ Kraemer A.D., Villani E., Arjoni D.H., (2019): "Aircraft FDI and human factors analysis of a take-off maneuver using SIVOR flight simulator", *IFAC-PaperOnLine*, 51(34)/2019, 184–189.

¹⁷ Olaganathan R. (2018): "Safety analysis of automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) system", *Int. J. Aerosp. Eng.*, 5(2)/2018, 9–18.

¹⁸ Ericson, C. A. (2015): *Hazard analysis techniques for system safety*, (2nd Ed.), Wiley Inter Science, New York, NY.

i opasnih efekata, utvrđivanje nivoa rizika, kao i mera za ublažavanje. PHA procenjuje dizajn sistema na preliminarnom nivou bez sveobuhvatnih informacija, i predstavlja preliminarnu analizu opasnosti projektovanja, čiji je osnovni cilj analiziranje opasnosti koje su identifikovane u preliminarnoj listi opasnosti, kao i utvrđivanje prethodno neprepoznate opasnosti u ranoj fazi razvoja sistema. Ova metoda identifikuje uzročne faktore opasnosti, posledice i relativni rizik na početno koncipirani projekat. PHA se može primeniti za analizu svih vrsta sistema, operacija i funkcija, kako na podsistemu i sistemu, tako i na integrisanom skupu sistema.

Tako, na osnovu preliminarne liste opasnosti, može se sprovesti analiza različitih opasnosti, njihovih uzroka, efekata, nivoa uticaja opasnosti na avio-sistem i preventivnih mera. Suštine ove analize primenjene na konkretnu situaciju, a to je opasnost od gubitka razdvajanja uzrokovane ljudskim faktorom, tj. greškom pilota (u avionu, tj. vazduhu), kontrolora (ATC sistem) ili pogrešnom komunikacijom između pilota i kontrolora, data je u tabeli 1 Na osnovu preliminarne liste opasnosti, može se sprovesti analiza različitih opasnosti, među kojima su i opasnosti koje nastaje usled ljudske greške.

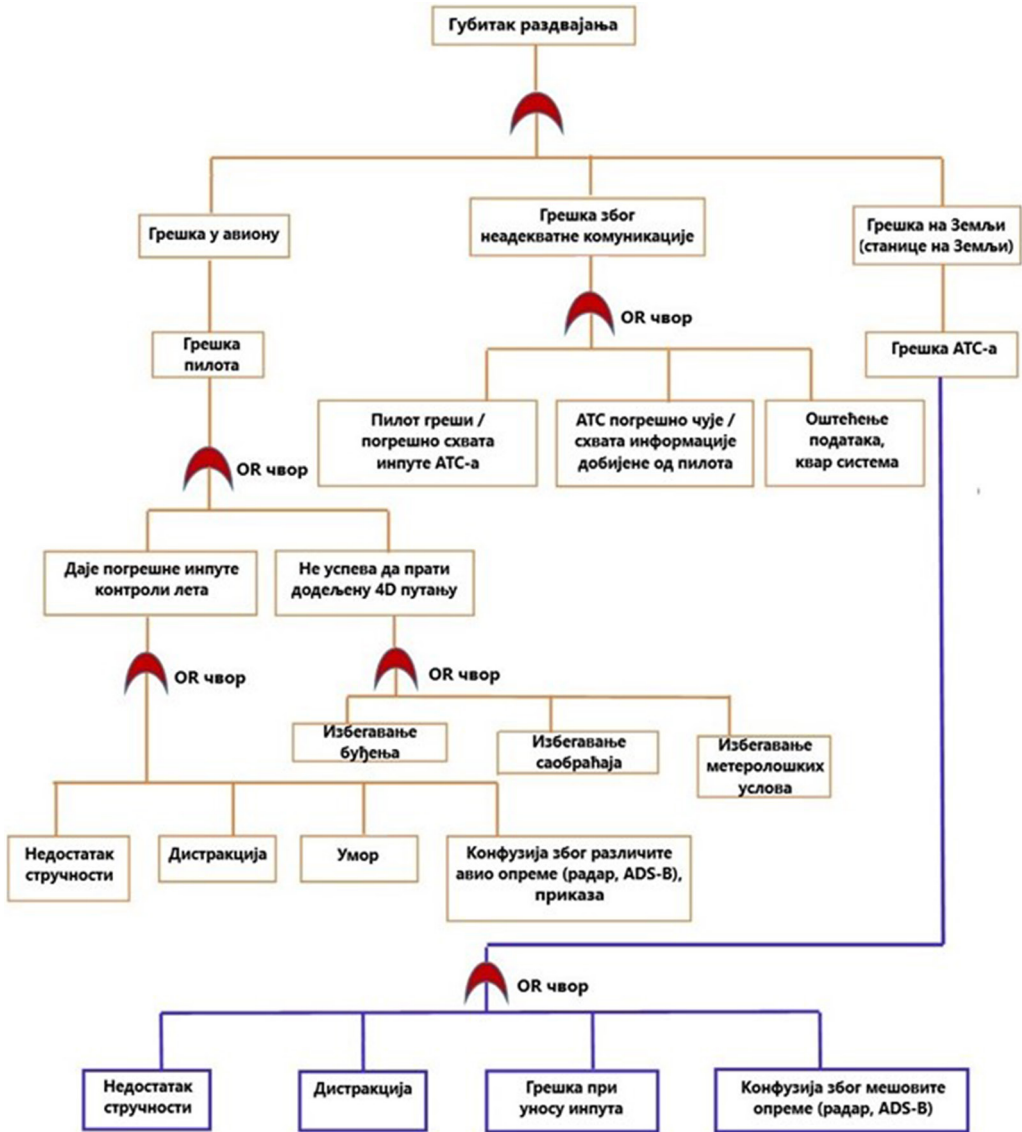
Kako je pomenuto, ADS-B kao veoma složen sistem, može biti izložen različitim vrstama opasnosti, a od identifikovanih vrsta, u radu Olaganathan R.¹⁷, razmatrane su samo one koje nastaju usled ljudske greške, i to, greške pilota, kontrolora i greške usled neadekvatne komunikacije između njih, koje se zatim analiziraju korišćenjem postojećeg metodološkog pristupa – analiza stabla grešaka.¹⁸ Suštine ove analize primenjene na konkretnu situaciju, a to je opasnost od gubitka razdvajanja uzrokovane ljudskim faktorom, tj. greškom pilota (u avionu, tj. vazduhu), kontrolora (ATC sistema) ili pogrešnom komunikacijom između pilota i kontrolora, šematski je prikazana na slici 1.

Šema analize ljudskog faktora (slika 1) sadrži pojedinačne faktore (među kojima su i ljudski), a koji utiču na gubitak razdvajanja. Ovi faktori povezani su OR čvorovima, tj. logičkim operaterima, s obzirom na to da bilo koji od datih faktora (pojedinačno) može prouzrokovati gubitak razdvajanja vazduhoplova. Na primer, faktori koji dovode do greške pilota su input netačnih podataka u ATC sistem i nemogućnost praćenja dodeljene 4D putanje; ovi faktori međusobno su zavisni, tj. povezani OR čvorom, jer bilo koji od ova dva faktora može prouzrokovati gubitak razdvajanja vazduhoplova. Takođe, problemi uzrokovani neadekvatnom komunikacijom između pilota i kontrolora, greške u unosu ulaznih podataka i konfuzija usled korišćenja različite opreme (radar i ADS-B) od strane kontrolora, nedostatak stručnosti, ometanje pažnje, itd., povezani su OR čvorom, jer bilo koji od ovih faktora može dovesti do gubitka razdvajanja.

Tabela 1. Preliminarna analiza opasnosti ADS-B izazvanih ljudskom greškom

Opis opasnosti	Uzrok	Efekat	Oznaka	Preventivne mere/ ublažavanje	Oznaka
Neemitovanje podataka	Neadekvatna upotreba – podešavanje pogrešnog režima transpondera od strane pilota	Povećanje opterećenja pilota; gubitak svesnosti situacije	3B	Podsećanje od strane kopilota ili proverom dokumentacije za let	4B
Pre poletanja, pilot može uneti pogrešan pritisak u visinomer	Nestručnost – pogrešna vrednost podešavanja pritiska koju je dao ATC	Sudar na zemlji ili u vazduhu	3C	Može se izbeći, ukoliko pilot ponovi vrednost ili ako je kontrolor stručan	4B
Pilot unosi pogrešan pritisak u visinomer	Nestručnost pilota	Sudar na zemlji ili u vazduhu	3C	Dvostruka provera podešavanja visinomera	4D
Utiče na sve operacije	Nestručnost-nepoznavanje ADS-B sistema	Gubitak razdvajanja	3B	Adekvatna obuka u vezi sa novim sistemima	4B
Pilot unosi pogrešan pritisak u visinomer	Nesporazum u komunikaciji - pilot pogrešno svata saopštenu vrednost podešavanja pritiska od strane ATC	Sudar na zemlji ili u vazduhu	3C	Može se izbeći, ukoliko pilot ponovi vrednost	4D
Pogrešan broj leta/registracija	Nedostatak svesnosti situacije od strane ATC-pogrešan pozivni znak u planu leta	Povećanje radnog opterećenja kontrolora	3D	Unakrsna provera plana leta od strane kontrolora	4D
Nepravilno povezivanje sa planom leta	Nedostatak svesnosti situacije pilota – netačan broj leta/registracija u FMS	Emitovanje netačnih podataka	3D	Podsećanje od strane kopilota/provera dokumentacije za let	4B
ATC može biti zbunjena vrednostima prikazanim na osnovu različitih izvora podataka	Konfuzija – različiti izvori podataka visine mogu zbuniti ATC	Različiti prikazi dovode do konfuzije	3D	Obavezna obuka u vezi sa funkcionisanjem ADS-B sistema	4C
ATC može primeniti različite standarde razdvajanja, radar ili ADS-B u odnosu na plan leta	Zbunjenost	Neadekvatno razdvajanje	3D	Obavezna obuka u vezi sa funkcionisanjem ADS-B	4B

Preuzeto i modifikovano iz: Olganathan R. (2018): "Safety analysis of automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) system", Int. J. Aerosp. Eng., 5(2)/2018, p. 15.



Slika 1. ADS-B sistem: analiza ljudskih faktora primenom FTA

Izvor: Kožović, D. (2023): „Multidisciplinarni aspekti sajber bezbednosti avio sistema ADS-B”, *Doktorska disertacija*, Fakultet za civilno vazduhoplovstvo, Megatrend univerzitet, Beograd, str. 179.

Ovakve i slične preliminarne analize opasnosti i primena metodološkog pristupa PHA, tj. FTA, koriste se u cilju identifikacije, rangiranja opasnosti i odbrane od različitih opasnosti po sigurnost sistema/operacije, kao i preporuka za sprečavanje/ublažavanje identifikovanih opasnosti. Na osnovu PHA, utvrđuju se neprihvatljivi, tj. kritični rizici (kvar na interfejsu ADS-B i povezanih sistema, kvar *Cockpit Display*

of *Traffic Information*, CDTI (displeja i prijemne antene), visoki rizici (npr. kvar GPS prijemnika, data linka, transponder/ADS-B emitera, satelita, itd.) koji zahtevaju više pažnje i kontinuirano praćenje, zatim, opasnosti koje imaju srednji nivo rizika ali se ne smeju ignorisati (npr. one rangirani kao 3B, 3C i 3D, tabela 1), kao i opasnosti niskog nivoa (minorne) koje zahtevaju povremenu inspekciju i održavanje (npr. opasnosti označene/rangirane sa 4B i 4C, tabela 1). Svakako, adekvatno postupanje u skladu sa preporukama može umanjiti rizike, a krucijalno je obezbediti relevantnu obuku pilota i kontrolora u vezi sa ADS-B tehnologijom, zatim, bezbednosnim aspektima u vezi sa komunikacionim sistemima vazduh-zemlja, donošenju odluka, kao i upravljanja resursima posade. Preporuka je i podsticanje, tj. zahtevanje da piloti, kao i ATC koriste visokokvalitetne komunikacione sisteme – transpondere (režim C i S) i ACAS (*Airborne Collision Avoidance System*). Naročito je važno koncipirati i primenjivati periodičnu obuku pilota kako bi se potvrdila njihova kurentnosti i odredio tip rejtinga za upotrebu ADS-B tehnologije, a što bi značajno smanjilo rizike u vezi sa implementacijom ADS-B sistema.

Dakle, pitanja ljudskog faktora su prihvatanje i korišćenje od strane pilota i kontrolora leta, izgradnja saradnje između pilota, kontrolora leta i sertifikacionih tela, i način na koji se delegiraju njihove uloge i odgovornosti, koje obezbeđuju sigurnost. Na primer, u slučaju koji je razmatran (procesa razdvajanja), primenom FTA, predviđaju se tri pristupa, koji se mogu prilagoditi: prvi - odgovornost za razdvajanje mora uvek biti na kontroloru, drugi - odgovornost se može delimično podeliti između pilota i kontrole leta, posebno tokom faze na ruti i treći - posada leta može modifikovati i koordinirati svoje odluke uz odobrenje kontrolora letenja.

4. ZAKLJUČAK

U eri digitalnih tehnologija, vazduhoplovna industrija postaje sve sofisticiranija s razvojem novih tehnologija kao što su ADS-B, *Head-Up* displeji (HUD), *Controlled Pilot Data-Link Communication* (CPDLC), *Flight Information Service* (FIS), itd. One su efikasan alat u zajedničkom donošenju odluka, kada su integrisane u ATM i kada ih koriste piloti i kontrolori leta.

Uvođenje ADS-B sistema je najnoviji doprinos efikasnom nadzoru aviona međusobno, kao i aviona i zemaljskih stanica, tj. ostvarivanju neometanih operacija vazdušnog saobraćaja. Veoma značajno pitanje u vezi sa ovom tehnologijom, je način na koji se ADS-B podaci/informacije mogu efikasno koristiti od strane različitih operatera, kao što su piloti i kontrolori, a u okviru svojih relevantnih nadležnosti. Jedna od zajedničkih perspektiva i pilota i kontrolora leta o implementaciji ADS-B jeste odgovornost. Pri tome, neophodno je da sertifikaciona tela dodele

odgovornost na način koji će poboljšati ukupnu sigurnost/bezbednost. Dakle, pitanja ljudskog faktora su prihvatanje i korišćenje ADS-B tehnologije od strane pilota i kontrolora leta, izgradnja saradnje između njih i sertifikacionih tela, kao i način na koji se delegiraju njihove uloge i odgovornosti, sve u cilju ostvarivanja sigurnosti/bezbednosti avio sistema/operacija. Uključivanje i insistiranje na osnovnim principima svesnosti situacije, trebalo bi da budu inkorporirane u napredne obuke pilota i kontrolora letenja u vezi sa donošenjem odluka, a ove obuke i primena adekvatnih mera ublažavanja opasnosti, mogu u značajnom meri smanjiti opasne situacije izazvane ljudskim greškama. ADS-B tehnologija omogućava smanjenja standarda razdvajanja, povećanje efikasnosti i kapaciteta vazdušnog prostora/avio operacija, pruža fleksibilnost, kao i povećava svesnost situacije. Istovremeno, ADS-B ima značajnu ulogu u poboljšanju kvaliteta životne sredine, smanjenjem emisija gasova staklene bašte i buke, kao i doprinosi finansijskim uštedama, smanjenjem troškova goriva. Glavni izazov koji je pred vazduhoplovnom industrijom je razvoj sistema upravljanja vazdušnim saobraćajem integracijom ljudske komponente, kao i adekvatnom raspodelom odgovornosti između pilota i kontrolora, tako obezbeđujući da ceo sistem funkcioniše efikasno.

LITERATURA

- Ericson, C. A. (2015): *Hazard analysis techniques for system safety*, (2nd Ed.), Wiley Inter Science, New York, NY.
- FAA (2025): *Automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B)*, https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb (01/10/2025).
- Hegarty, C., Shallberg, K., Walter, T., Alexander, K. (2018): “Spoofing detection for airborne GNSS equipment”, in *Proceedings of 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, FL, 2018, 1350-1368.
- Kožović, D., Đurđević, D. (2019): “Sajber bezbednost u avijaciji”, *Megatrend revija*, 16(2)/2019, 39-56.
- Kožović, D., Đurđević, D. (2021): “Spufing u civilnoj avijaciji: Bezbednost i sigurnost GPS/GNSS I ADS-B sistema”, *Megatrend revija*, 18(3)/2021, 281-306.
- Kožović, D. (2023): *Multidisciplinarni aspekti sajber bezbednosti avio sistema ADS-B*, Doktorska disertacija, Fakultet za civilno vazduhoplovstvo, Megatrend univerzitet, Beograd.
- Kraemer A.D., Villani E., Arjoni D.H., (2019): “Aircraft FDI and human factors analysis of a take-off maneuver using SIVOR flight simulator”, *IFAC-Paper OnLine*, 51(34)/2019, 184–189. doi:10.1016/j.ifacol.2019.01.063

- McLean D. (2003): “Operational Requirements for Fully Automatic Flight”, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, 75(6)/2003, 570–574. DOI: 10.1108/00022660310503039
- Olganathan R. (2018): “Safety analysis of automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) system”, *Int. J. Aerosp. Eng.*, 5(2)/2018, 9–18.
- Pavić A., Lalić B., Đurđević M. (2014): “Osnove ADS-B tehnologije i osmatranje područja Republike Srbije bez radarske pokrivenosti”, *Zbornik radova Infoteh–Jahorina*, 13, 419–424, <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2014/radovi/KST-2/KST-2-4.pdf> (04/10/2025).
- Pierpaoli, P., Egerstedt, M., Rahmani, A. (2015): “Altering UAV flight path by threatening collision”, in: *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th (2015)*, IEEE, 4A4-1-4A4-10.
- Sathaye, H., Schepers, D., Ranganathan, A., Noubir, G. (2019): “Wireless attacks on aircraft instrument landing systems”, in: *28th USENIX Security Symposium, August 14–16, 2019*, Santa Clara, CA, USA, 1-16.
- Silva S.S., Cho H., Hansman R.J. (2014): “Human factors studies of an ADS-B based traffic alerting system for general aviation”, in: *Proceedings of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014)*, St. Petersburg, Russia, 10p, https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2014/data/papers/2014_0419_paper.pdf (01/10/2025).
- Stevanović, D. M., Đurđević, D. (2016): “Internet stvari, lična i materijalna bezbednost”, *Bezbednost*, 3/2016, 113-128.
- Ying X., Mazer J., Bernieri G., Conti M., Buschell L., Poovendran R. (2019): “Detecting ADS-B spoofing attacks using deep neural networks”, in: *Proceeding of the IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS2019)*, Washington D.C., USA, 9 p. DOI: 10.1109/CNS.2019.8802732.

ADS-B AVIATION SYSTEM SAFETY: A HUMAN FACTORS ANALYSIS

Abstract: *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) is one of the important systems integrated in the Next Generation Air Transportation System (NextGen) and Single European Sky Air Traffic Management Research (SESAR) programs, which enables the realization of a safer/safer and more efficient airspace system. In addition to numerous advantages, such as simple implementation, cheap hardware and high positioning accuracy, this wireless communication protocol has some significant drawbacks and they are reliance on the satellite navigation system (which can be physically damaged/corrupted/exposed to interference) as well as a oversimple protocol that does not provide authentication and encryption. Thus, in addition to being real, threats to the cyber security of ADS-B systems are also constantly increasing. In spite of all this, a very important aspect of using ADS-B is the human factor, which in aviation most often refers to the aspects of human error in aviation accidents and aviation system failures. As ADS-B provides data from which numerous advanced applications can be derived, the implementation of new ADS-B equipment and procedures expands the spectrum of human factors issues, such as understanding the use of automated on-board systems, which are becoming increasingly complex. That is why the analysis of the safety of the ADS-B system is of great importance, i.e. considering potential hazards and analyzing them, using certain methodological approaches, such as Preliminary Hazard Analysis (PHA), i.e. Preliminary Hazard Analysis/Fault Tree. This approach relies on evaluating identified hazards in hazards preliminary list as well as previously unrecognized hazards identification in the early stages of system development, all, in order to provide recommendations for preventing/mitigating the identified hazards.*

Keywords: *ADS-B, civil aviation, human factor, preliminary hazard analysis, safety, security*