

IDENTIFIKÁCIA RIZÍK PREVÁDZKY SKUPINY UAV VYUŽITÍM ANALÝZY PRÍČIN A NÁSLEDKOV

Pavol PECHO, Július FEDÁŠ

ÚVOD

Hodnotenie spoľahlivosti je dôležitou a neoddeliteľnou súčasťou plánovania, navrhovania, výroby a prevádzky všetkých inžinierskych systémov. Ich zlyhanie môže často spôsobiť účinky, ktoré siahajú zanedbateľných až po tie so závažným dopadom na spoločnosť a prostredie. V prípade UAV hrá spoľahlivosť dôležitú úlohu, keď si jeho použitie vyžaduje zaistenie bezpečnostných podmienok, aby sa umožnil bezproblémový prístup do vzdušného priestoru. Štúdia spoľahlivosti UAV tiež umožňujú identifikovať potenciálne prostriedky na zlepšenie dostupnosti a efektivity ich použitia, ako aj zníženie obstarávacích a prevádzkových nákladov [1].

Počas procesu navrhovania UAV¹ existuje niekoľko aspektov, ktoré by sa mali vziať do úvahy. Medzi najdôležitejšie aspekty sú považované vytrvalosť, dolet, zaťaženie, bezpečnosť a funkčnosť. Bezpečnosť sa zvyčajne dosahuje pomocou hardvérovej redundancie a niektorých ďalších metód, ako je adaptívne riadenie a včasná detekcia porúch. Funkčnosť je dosiahnutá výberom vhodných hardvérových a softvérových modulov. Návrh UAV je však komplexná úloha a musia ju vykonávať odborníci z rôznych oblastí odbornosti. Jednou z najdôležitejších potrieb pri navrhovaní a vývoji UAV je mať vopred známe všetky požiadavky [2][3][4]. Je dôležité preskúmať možné situácie, ktoré môžu nastať počas prevádzky UAV. Na tento typ analýzy a vyšetrovania sa používajú rôzne metódy.

Jednou z často používaných metód, vykonávaných už v koncepčnom štádiu návrhu systému, je analýza príčiny a následkov porúch (Failure Mode and Effect Analysis). Táto metóda sa používa na efektívne predpovedanie a zvládanie rôznych režimov porúch a ukázalo sa, že je to skutočne efektívny a spoľahlivý nástroj systémového inžinierstva. Práve to je dôvod voľby tejto metódy pre potreby identifikácie rizík skupinovej prevádzky UAV, kedy sa riziko a možnosť zlyhania jednotlivých bezpilotných prostriedkov ale aj systému ako celku násobne zvyšuje.

1 FMEA – ANALÝZA PRÍČIN A NÁSLEDKOV V PRAXI

FMEA je analytická technika na definovanie, identifikáciu a odstránenie známych a/alebo potenciálnych porúch, problémov a chýb zo systému, návrhu, procesu a/alebo služby predtým, ako sa dostanú ku konečnému používateľovi [5]. Hlavným cieľom FMEA je identifikovať potenciálne spôsoby zlyhania, vyhodnotiť príčiny a účinky rôznych spôsobov zlyhania komponentov a určiť, čo by mohlo eliminovať alebo znížiť pravdepodobnosť zlyhania. Výsledky analýzy môžu pomôcť analytikom identifikovať a opraviť chybové režimy, ktoré majú škodlivý vplyv na systém, a zlepšiť jeho výkon počas štádií návrhu a výroby. FMEA sa používa predovšetkým na vykonávanie analýz rizík podsystémov a systémov, ale môže byť užitočná aj pri vykonávaní predbežných analýz nebezpečenstiev a prevádzkových analýz nebezpečenstiev. Od svojho zavedenia ako podporného nástroja pre dizajnérov sa FMEA vo veľkej miere používa v širokom spektre priemyselných odvetví,

¹ UAV - Unmanned Aerial Vehicle (Bepilotný lietajúci prostriedok)

vrátane leteckého, automobilového, jadrového, elektronického, chemického a medicínskeho priemyslu [6][7][8]. FMEA sa pôvodne používala pre mechanické komponenty, ale dnes je veľmi užitočná v elektronických a softvérových komponentoch [9].

Poskytuje prostriedky na identifikáciu a dokumentáciu:

1. Potenciálne oblasti zlyhania v procese, systéme, komponente alebo postupu.
2. Možné dôsledky zlyhania procesu, systému, komponentu alebo postupu.
3. Možné príčiny zlyhania.
4. Metódy znižovania pravdepodobnosti zlyhania.
5. Metódy zlepšovania prostriedkov zisťovania príčin porúch.
6. Klasifikácia rizík zlyhaní, ktorá umožňuje rozhodnutia na základe rizika.
7. Východiskový bod, z ktorého je možné vytvoriť plán kontroly.

Hlavnými výhodami použitia metódy FMEA je zníženie nákladov, skrátenie času potrebného od projektovej fázy po uvedenie na trh, zlepšenie kvality a spoľahlivosti produktov, pričom nastáva zvýšenie bezpečnosti ich prevádzky.

1.1 Typy FMEA analýzy

FMEA návrhu

Účelom tohto typu FMEA je identifikovať a predchádzať poruchovým režimom výrobkov, ktoré súvisia s ich návrhom, aby sa overili stanovené parametre návrhu pre špecifickú úroveň funkčného výkonu na úrovni systému, subsystému alebo komponentu. Najdôležitejšou funkciou tohto typu FMEA je identifikácia v počiatočných fázach vývoja návrhu možných porúch s cieľom eliminovať ich vplyvy, vybrať optimálny variant návrhu a vytvoriť dokumentačnú základňu na podporu budúcich návrhov s cieľom minimalizovať riziko, že sa chybné produkty dostanú ku koncovému používateľovi [10].

FMEA procesu

Sa zameriava na potenciálne zlyhania procesu, ktoré sú spôsobené nedostatkami výrobného alebo montážneho postupu. Procesná FMEA je dvoch typov: výrobná FMEA a montážna FMEA. Vo FMEA výroby sú režimy porúch vo všeobecnosti rozmerové alebo vizuálne. Zatiaľ čo v FMEA zostavy sú to vo všeobecnosti relačné rozmery, chýbajúce diely, diely zmontované nesprávne [10].

1.2 Metóda FMEA analýzy

V FMEA hrá funkčná analýza kľúčovú úlohu pri identifikácii potenciálnych porúch. Pomáha pochopiť rôzne funkcie a súvisiace výkonnostné kritériá systému a každého jeho funkčného bloku a identifikovať vzájomné vzťahy medzi funkciami.

Prvým krokom v FMEA je identifikácia všetkých možných spôsobov zlyhania produktu alebo systému prostredníctvom systematického brainstormingu. Ďalej by sa mali pre každý komponent identifikovať všetky možné spôsoby zlyhania. Pre každý komponent sa musia zvážiť účinky každého režimu poruchy na ostatné komponenty alebo celý systém – s osobitnou pozornosťou venovanou akýmkoľvek poruchám v bežnom režime [11]. Potom sa vykoná kritická analýza týchto porúch, pričom sa zohľadnia rizikové faktory: výskyt (V), závažnosť (Z) a detekcia (D) [10].

RPN (Risk Priority Number), hodnota rizika, sa vypočíta vzájomným vynásobením výskytu, závažnosti a detekcie:

$$RPN = V * Z * D$$

Na získanie RPN potenciálneho režimu zlyhania sa jednotlivé rizikové faktory hodnotia pomocou 10-bodovej stupnice (Tabuľka 1). Čím vyššie je RPN režimu zlyhania, tým väčšie je riziko pre spoľahlivosť produktu/systému. Vzhľadom na skóre RPN je možné zoradiť režimy zlyhania a potom sa prednostne prijímú správne opatrenia pre režimy s vysokým rizikom zlyhania. RPN by sa mali po zavedení korekčných opatrení prepočítať, aby sa zistilo, či sa riziká znížili, a aby sa skontrolovala účinnosť nápravných opatrení pre každý režim zlyhania [5][10].

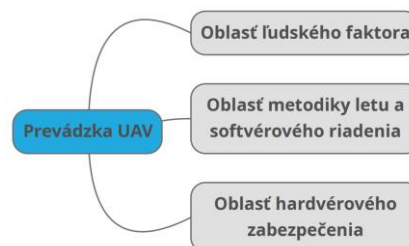
Tabuľka 1: Hodnota parametrov na určenie RPN.

Výskyt (V)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Výskyt takmer nemožný					Výskyt takmer neodvratný				
Závažnosť (Z)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Minimálny efekt na bezpečnosť					Katastrofické zlyhanie				
Detekcia (D)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Detekcia istá					Nedetekovateľné				

Dokončené výsledky FMEA môžu slúžiť ako spätná väzba pre proces návrhu, umožňujúca informované revízie, ktoré zlepšujú spoľahlivosť systému. Závažnosť môže byť znížená iba zmenou dizajnu. Ak je to dosiahnuteľné, potom sa porucha odstráni. Výskyt možno znížiť zlepšením špecifikácií úloh a/alebo požiadaviek v službe/procese s cieľom predchádzať príčinám alebo znížiť ich frekvenciu. Detekciu možno znížiť pridaním alebo zlepšením vyhodnocovacích techník, zväčšením veľkosti vzorky a/alebo pridaním detekčného zariadenia. Výsledkom bude zlepšenie schopnosti odhaliť poruchu skôr, ako sa dostane k zákazníkovi [5].

2 APLIKÁCIA FMEA DO HODNOTENIA RIZÍK UAV

V procese hodnotenia rizík či už prevádzky samostatného UAV, alebo skupiny, je potrebné zohľadnenie niekoľkých aspektov, ktoré so sebou nemusia priamo súvisieť pri zohľadnení spoločných merateľných ukazovateľov. Počas tvorby FMEA návrhu ide o oblasti zachytené na nasledujúcom obrázku pomocou vizualizácie hierarchie FMEA.



Obr. 1 Základné členenie systému v prvej úrovni FMEA

Napriek tomu že dané oblasti spolu nesúvisia, sú vzájomne prepojené cez prevádzku UAV a ďalej pokrývajú sekundárne, až terciárne oblasti po ich jednotlivom rozčlenení. Nasledujúce podrobné členenie identifikuje schému hierarchie oblastí pre návrh tvorby FMEA analýzy a jej využitia v praxi.

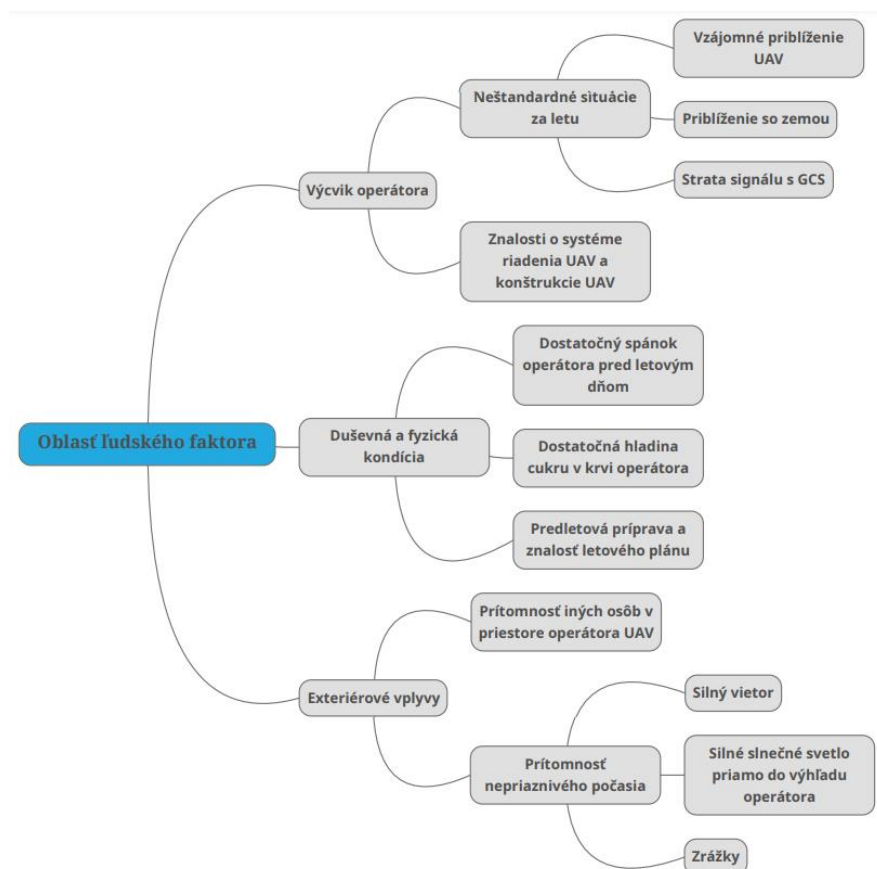
Prvou oblasťou FMEA analýzy je ľudský faktor (Obr. 2), alebo faktory. Ľudské faktory sa vzťahujú na environmentálne, organizačné a pracovné faktory a ľudské a individuálne vlastnosti, ktoré ovplyvňujú správanie pri práci spôsobom, ktorý môže ovplyvniť zdravie a bezpečnosť. Ide o podstatný vplyv na celkovú bezpečnosť prevádzky a z pohľadu sekundárneho členenia sem spadajú nasledovné oblasti:

- výcvik operátora,
- exteriérové vplyvy,
- duševná a fyzická kondícia.

V rámci týchto vplyvov sa môže na príklade parametra výcviku operátora vyskytnúť chyba v podobe nevládnutej neštandardnej situácie, ktorá by sa dala vyhodnotiť vynásobením výskytu, závažnosti a detekcie ako:

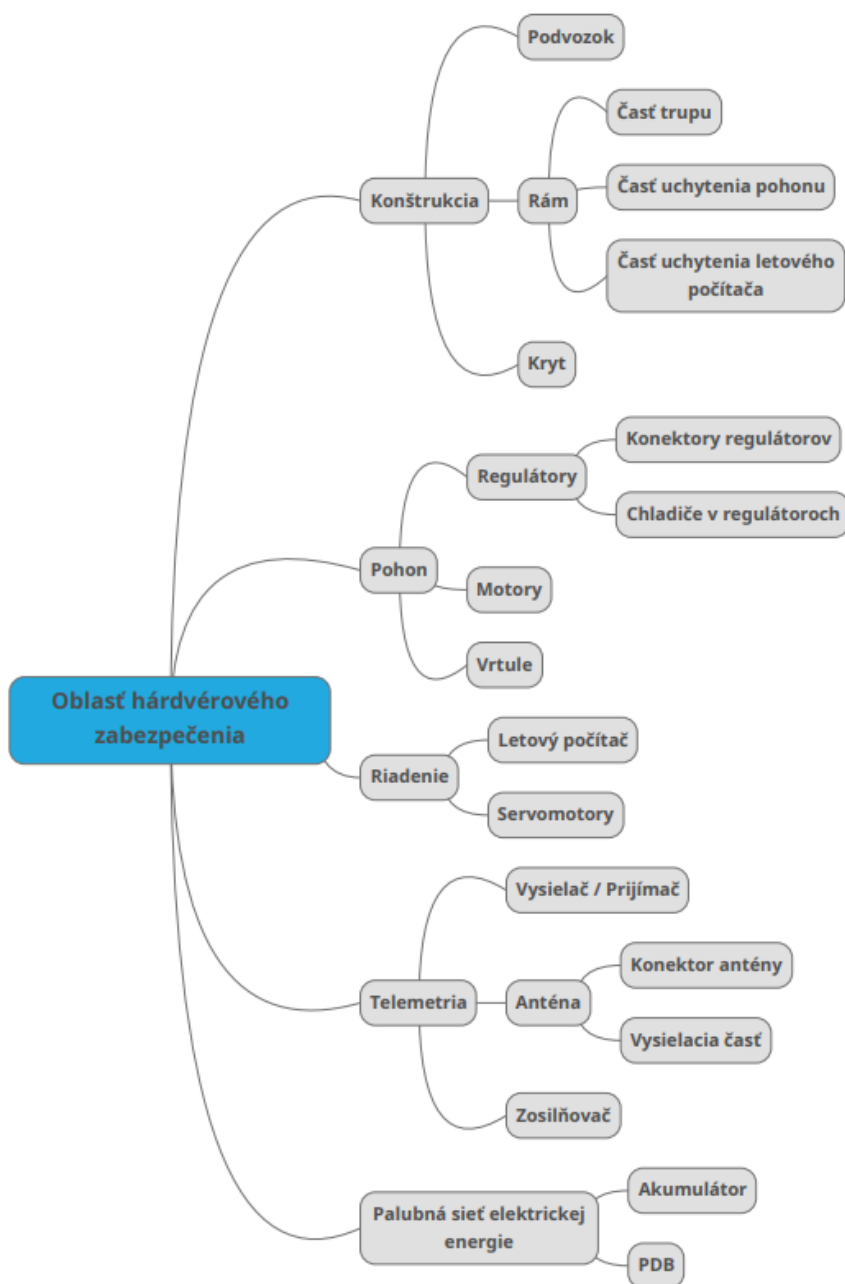
- výskyt – nevyskytujúca sa často (hodnotenie 2),
- závažnosť – v prípade že sa chyba udeje, závažnosť bude vysoká (hodnotenie 10),
- detekcia – takúto absenciu skúseností ťažko detegovať (hodnotenie 8).

V prípade že operátor neštandardnú situáciu nevládne, vedie to k havárii UAV a k udalostiam, ktoré sú nepriaznivé. Daná oblasť môže byť prepojená ako s konštrukciou, napríklad vznik neštandardnej situácie v dôsledku poruchy hardvérového zabezpečenia, alebo môže byť prepojená s oblasťou metodiky letu a softvérového riadenia, kedy môže vzniknúť neštandardná situácia v dôsledku nesprávne zvolenej metodiky letu.



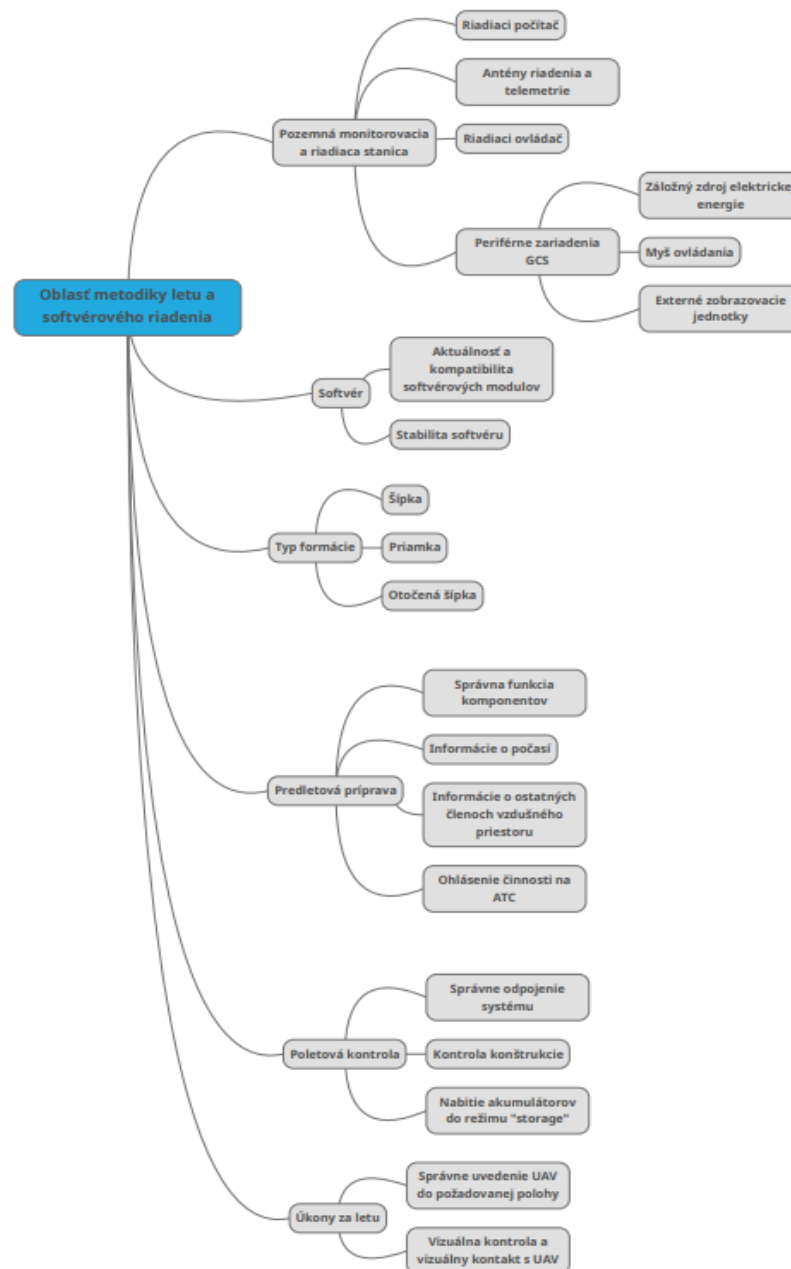
Obr. 2 Schéma hierarchie oblasti ľudského faktora prevádzky UAV

Druhou väčšou oblasťou je hardvérového zabezpečenie. Ide o štandardnú analýzu technickej schémy konštrukcie UAV a identifikácie kritických miest v konštrukcií. Daná oblasť pokrýva všeobecné rozloženie komponentov pre UAV typu multikoptér, ako aj pevných krídel a helikoptér. Oblasť je prepojená aj na ostatné dve (ľudský faktor a metodika letu) formou spoločných následkov v prípade zlyhania, prípadne formou spoločnej funkčnej siete s vrcholovou udalosťou, a to je úspešné zvládnutie letovej misie. V hierarchii siete (Obr. 3) je možné rozdeliť sieť na konštrukciu, rám, podvozok, riadenie a podobne. Ako príklad niektorej časti je možné uviesť napríklad vrcholový komponent – vrtuľu pohonu, ktorá sa nachádza v sekcii pohonu. Samotná vrtuľa môže byť uvedená do stavu kedy neplní funkciu hneď niekoľkými spôsobmi ako napríklad zlé dotiahnutie skrutiek, prasklina na vrtuli, alebo napríklad tvorba námrazy, ktorá je prepojená s oblasťou metodiky letu, alebo aj exteriérovými vplyvmi. Všetky poruchové stavy je možné individuálne hodnotiť na výšku RPN.



Obr. 3 Schéma hierarchie oblasti hardvérového zabezpečenia prevádzky UAV

Poslednou oblasťou hlavného rozdelenia je oblasť metodiky letu a softvérového riadenia. V rámci aplikácie FMEA ide o pokrytie najmä procesných úkonov, ktoré zohrávajú kľúčovú rolu v úspešnom prevedení misie UAV či už v lete sólo, alebo v skupine. Táto oblasť v sebe zahŕňa okrem úkonov aj pozemnú riadiacu a monitorovaciu stanicu (GCS²) a softvér riadenia. V praktickej prevádzke ide o komponenty, bez ktorých by let nebol uskutočniteľný a preto zohrávajú kľúčovú rolu. V príklade hierarchie (Obr. 4) sa GCS skladá z komponentov ako riadiaci počítač, periférnych komponentov, softvéru, antén a podobne. V prípade zlyhania niektorého z komponentov by mohlo viesť toto zlyhanie k prerušeniu misie, alebo až k poruche a havárii UAV. Prepojenie danej oblasti s inými je prostredníctvom priamej linky medzi GCS a napríklad pohonom UAV, ktorý je riadený pokynmi softvérového riadenia GCS.



Obr. 4 Schéma hierarchie oblasti metodiky letu a softvérového riadenia prevádzky UAV

² GCS – Ground Control Stations – Pozemná riadiaca a monitorovacia stanica

Okrem riadenia zohráva kľúčovú rolu aj metodika letu, typ formácie, a príprava a kontrola UAV pred a po lete, respektíve misií. Zásadným faktorom je aj uloženie UAV pred vzletom a ich uloženie do formačných pozícií. Nasledujúci obrázok (Obr. 5) zachytáva simulovanú trajektóriu letu troch UAV vo formácií v tvare šípky a vzájomné prekríženie trajektórií. Na obrázku je možné vidieť že oranžová trajektória sa v prípadoch ostrých zákrut stretáva so žltou trajektóriou, čo znamená riziko stretu UAV za letu. Pomocou simulácie je preto možné presné stanovenie hodnôt možnosti detekcie (D) a výskytu (V) a s jasne stanoveným parametrom závažnosti (Z) pre určenie hodnoty RPN.



Obr. 5 Ukážka trajektórií letu formácie v tvare šípky troch UAV

Z pohľadu FMEA je identifikácia typu formácie variabilný podľa typu zvoleného UAV, preto sa v hierarchii a formulári FMEA vyskytuje v presne stanovenom tvare. Ako príklad možno uviesť faktory ovplyvňujúce vhodnosť výberu formácie – rýchlosť letu, vertikálna a horizontálna vzdialenosť UAV, uhol zákrut UAV a podobne.

Z pohľadu prepojenia primárnych oblastí je možné uviesť príklad v poletovej kontrole letu UAV a uvedenia akumulátorov do režimu „storage“, teda nabitia, alebo vybitia akumulátorov na hodnotu napätia pre dlhodobé skladovanie akumulátora bez činnosti. Štandardnou hodnotou je napätie 3,8V na jeden článok akumulátora. V prípade ak by sa dlhodobo nechal akumulátor buď v plne nabitom stave, alebo opačne, akumulátor by nespĺňal očakávané parametre letu a stratil by potrebnú kapacitu, čo by viedlo k poruchovému stavu z oblasti hardvérového zabezpečenia, ako aj k neštandardnej situácii za letu – teda oblasti z ľudského faktora a k samotnej havárii UAV. Príklady hierarchie FMEA analýzy zachytávajú nasledujúca schémy obrázkov 2 až 4, ktoré v sebe spájajú v niektorých prípadoch až 4 úrovne jednotlivých parametrov daného systému pre hodnotenie úrovne RPN zobrazených častí, celkov a komponentov. Takto aplikovaná FMEA analýza je v praxi schopná zvýšiť bezpečnosť letov UAV a identifikovať kritické miesta, ktoré súvisia priamo s ich prevádzkou.

ZÁVER

Predkladaný článok predstavuje návrh využitia analýzy príčin a následkov (FMEA) v procese hodnotenia rizika prevádzky UAV ako v samostatnom, tak v skupinovom lete pre zabezpečenie čo najvyššej možnej miery bezpečnosti. V súčasnosti sa UAV prevádzkujú na dennej báze od amatérskych cez profesionálnych používateľov, až po aplikácie silových, záchranných a vládnych zložiek. Zvýšenie bezpečnosti vplýva významným spôsobom na legislatívnu úpravu začlenenia UAV do rôznych aplikácií a predovšetkým v ich priemyselnom využití. Práve systém hodnotenia rizík by umožnil objektívne hodnotenie reálnych rizík a stanovenie úrovne bezpečnosti prevádzky konkrétneho systému s možnosťou nápravných opatrení.

POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémie spôsobenej COVID-19“, Kód ITMS2014+: 313011ATR9, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Použitá literatúra

- [1] DoD. *Unmanned Aerial Vehicle Reliability Study*. Department of Defense, Office of the Secretary of Defense, 2003.
- [2] Torun, E. *Uav requirements and design consideration*. Turkish Land Forces Command Ankara. TURKEY, Tech. Rep., 2000.
- [3] Elands, P., Kraker, J., Laarakkers, J., Olk, J., Schonagen, J. *Technical aspects concerning the safe and secure use of drones*. TNO, Tech. Rep., 2016.
- [4] Schneider, T. *Fault-tolerant Multicopter Systems*. ETH Zurich, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2011.
- [5] Stamatis, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. New York: ASQC Press, 2003.
- [6] Chang, K. H., Cheng, C. H. *Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011. s. 113–129.
- [7] Chen, L. H., Ko, W. C. *Fuzzy linear programming models for new product design using QFD with FMEA*. Applied Mathematical Modelling, 2009. s. 633–647.
- [8] Sharma, R. K., Kumar, D., & Kumar, P. *Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005. s. 986–1004.
- [9] Ahamad, S., Gupta, R. (2022). *Criticality Analysis for Safety-Critical Systems Using FMEA*. Innovations in Computing. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore, 2022.
- [10] Sharma, K.D. Srivastava, S. *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review*. Copyr. J. Adv. Res. Aeronaut. Sp. Sci. J. Adv. Res. Aero SpaceSci, 2018.
- [11] Freeman P., G. J. Balas G. J. *Actuation failure modes and effects analysis for a small UAV*, American Control Conference, Portland, OR, USA, 2014. s. 1292-1297.

Autori:

Ing. Pavol Pecho, PhD.

odborný asistent

Žilinská univerzita v Žiline, F PEDaS, Katedra leteckej dopravy

Július Fedáš

študent 5. ročníka odboru Letecká doprava