

Rafał PERZ ORCID 0000-0001-9285-6241
Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

IMPLICATIONS OF PILOT RELIABILITY ON THE PROBABILITY OF UNMANNED AIRCRAFT CRASHES

Wpływ niezawodności pilota na prawdopodobieństwo wystąpienia zderzenia bezzałogowych statków powietrznych

Abstract: *This paper presents the issue of human reliability in the perspective of the safety of missions carried out by unmanned aerial vehicles, known as drones. The ever-increasing range of applications and widespread access to drones generates the risk of collisions, which greatly affects the safety of people, the environment and infrastructure elements. The aim of this study was to determine reliability for two variants of operations scenarios for different levels of pilot experience and to compare them. The analysis of pilot reliability, carried out using the HEART method, indicated that there are a number of factors that determine the level of pilot reliability affecting the probability of a collision occurring.*

Keywords: reliability, unmanned aerial vehicles, safety

Streszczenie: *W artykule przedstawiono zagadnienie niezawodności człowieka w kontekście bezpieczeństwa misji realizowanych przez bezzałogowe statki powietrzne, nazywane dronami. Nieustannie rosnący zakres zastosowania oraz powszechny dostęp do dronów generuje ryzyko wystąpienia kolizji, co w dużym stopniu wpływa na bezpieczeństwo ludzi, środowiska naturalnego oraz elementów infrastruktury. Celem pracy było określenie niezawodności dla dwóch wariantów scenariuszy operacji dla różnego poziomu doświadczenia pilota oraz ich porównanie. Analiza niezawodności pilota, przeprowadzona z użyciem metody HEART, wskazała że istnieje szereg czynników warunkujących poziom niezawodności pilota, wpływający na prawdopodobieństwo wystąpienia zderzenia.*

Słowa kluczowe: niezawodność, bezzałogowe statki powietrzne, bezpieczeństwo

1. Introduction

Unmanned aerial vehicles, also known as drones, play a major role in the functioning of the modern world. These devices are used in many applications in both military and civilian areas, including entertainment. Drones are used in taking photographs and videos, for surveillance, monitoring, execution of transport processes, and rescue operations, as well as for spraying, precision agriculture and many other activities [1-4]. There is a wide range of solutions available on the market, which vary in size, weight, range, maximum altitude, method of launch, weather resistance or installed instrumentation.

One of the basic criteria for the classification of drones is weight, which is used in a wide range of classification variants, and also relates to the requirement for the drone user to hold the relevant rating or to register the flight. Current regulations in EU countries indicate that drones with a mass of more than 0.25 kg must be operated by pilots who have passed an online course and a specific test. Distinguishing UAV users into professionals and amateurs based on their permissions may be inaccurate. Professionals can be authorized to operate in a specific or certified category. At the same time, amateur pilots might be competent to fly in the open category, where drones weighing up to 25 kg can be flown, maintaining the legally required distance from people. This means that it is difficult to categorise pilots as either professionals or amateurs [1,5-9].

The ever-increasing scope of use and widespread access to drones creates numerous potential hazards affecting different areas. The most significant hazards are those related to air traffic, arising from violations of flight restrictions, failure to obtain necessary permissions for operations, or irresponsible pilot behaviour. Other potential hazards include the use of drones for terrorist or criminal activities. A critical potential hazard is the possibility of causing collisions, which could greatly impact the safety of people, the environment, and infrastructural elements [10-14].

The paper's main objective is to analyze the reliability of the unmanned aircraft pilot for two variants of operational scenarios. The difference between the variants considered was the pilot's experience level in using a particular drone model. The first variant assumed the use of a drone with which the pilot had no previous experience, while the second variant assumed the use of a drone with which the pilot had already flown. The results obtained were compared with each other.

2. Collisions of unmanned aerial vehicles

An essential element in the safe use of UAVs is the reliability of the individual components of the overall system. The main components of an unmanned aerial system include the drone and the equipment enabling remote control of the device. Carrying out a flight requires the appropriate procedures for the execution of operations and the involvement of the human factor responsible for the organization and execution of the

flight. The correct functioning of all components determines the proper and safe execution of the operation. The behaviour of personnel is of utmost importance and it must have the necessary competencies and skills to perform the various activities related to the preparation for the drone operation, the apparatus and the execution of the flight itself [10,15-19]. The main risk factors that may contribute to a crash are:

- pilot mistakes during operations,
- incorrect maintenance and flight preparation operations,
- defects in the drone's subsystems and equipment,
- communication interruptions between the device and the control station,
- negative weather conditions,
- sudden, unforeseen obstacle in the UAV flight path.

Crashes of UAVs can be classified in different ways, taking into account other aspects of the collision. By dividing them according to the stage of operation, it is possible to distinguish between crashes during take-off, flight execution and landing. When considering the issue in terms of the causative factor, a distinction is made between collisions caused by incorrect pilot behaviour (e.g. incorrect programming of the device, inattentive observation of the environment), collisions caused by a malfunction of the drone (e.g. power system, propulsion system) or due to external factors (e.g. bad weather conditions, unexpected appearance of another object on the flight path). A mid-air collision may include an impact on another aircraft (manned or unmanned), on birds or structures or infrastructure elements, including buildings, structures, linear objects and landscaping. Collisions of falling drones that may strike humans are a separate issue. The consequences of a collision can be divided into personal and economic [16,17,20].

The occurrence of unmanned aircraft collision is minimized through a wide range of measures. Solutions of a legal and organizational nature and technical solutions, including drone safety systems and systems and UAV detection and neutralization systems, should be considered the most important [13,21-23]. Legal measures to reduce the risk of crashes include regulations requiring pilots to complete training, rules requiring flight registration and separating air traffic zones, and regulations related to the safety systems that marketed solutions must have [8,24].

Collision mitigation safety systems installed in drones include in-flight positioning of the device and obstacle detection. Collision-induced impacts are minimized by using guards for moving parts that can cause significant human injury upon impact. A separate group is computational collision avoidance systems ACAS (Airborne Collision Avoidance System) and airborne separation assurance systems ASAS (Airborne Separation Assurance System). These systems use computational algorithms to detect the presence of aircraft posing a collision risk and initiate manoeuvres to avoid it [25-28].

Detection and neutralization systems for unmanned aerial vehicles also impact collision risk reduction. These systems are used to provide protection for sensitive facilities, such as critical infrastructure or airports. Solutions based on audio techniques (noise emitted by the drone), vision techniques (recognition of the moving object in the background), radio wave detection (identification of communication between the drone and the control

apparatus) and radar are used for detection. Kinetic methods (nets, birds of prey, firearms, interceptor drones) and non-kinetic means (seizure of control, control interference, heat lasers, electromagnetic guns) are applied to neutralize the drone. The disadvantage of most solutions that neutralize drones is that they cause the drone to fall to the ground uncontrollably. This issue is crucial since it is difficult to estimate the actual consequences of knocking down a drone, which may collide with objects on the ground [11,13,29-31].

3. Research methodology

Reliability analysis of an operator of a technical system can be carried out using various methods and measurement techniques. Developed in 1985 by J. C. Williams, the Human Error Assessment and Reduction Technique HEART determines the probability of human error during operator tasks. The method provides a relatively simple and rapid assessment of the reliability of the human factor in the correct execution of a process [32-36].

Table 1

Generic Task Types GTT table

Code	Task type	GEP
A	Totally unfamiliar; performed at speed with no real idea of likely consequences.	0.55
B	Shift or restore system to a new or original state on a single attempt.	0.26
C	Complex task requiring high level of comprehension and skill.	0.16
D	Fairly simple task performed rapidly or given scant attention.	0.09
E	Routine, highly practiced, rapid task involving relatively low level of skill.	0.02
F	Restore or shift a system to original or new state following procedures with some checking.	0.003
G	Completely familiar, well- designed, highly practiced, routine task occurring several times per day, performed to highest possible standards by highly motivated, highly trained, and experienced personnel, with time to correct potential error, but without the benefit of significant job aid.	0.0004
H	Respond correctly to system command even when there is an augment or automated supervisory system providing accurate interpretation of system state.	0.00002
M	Miscellaneous task for which no description can be found.	0.03

The HEART reliability analysis determines the scenario of actions performed by the system operator and assigns them to the appropriate type according to the Generic Task

Types GTT table, indicating the nominal error value Generic Error Potential GEP. The GTT table is shown in Table 1.

The next step is to assign the relevant Error Producing Conditions EPC to each identified operator task. There are 40 EPC factors with specific multiplier values. Examples of EPC include:

- EPC1, indicating „Unfamiliarity”, with a multiplier value of 17.00;
- EPC2, indicating „Time shortage”, with a multiplier value of 11.00;
- EPC7, indicating „Irreversibility”, with a multiplier value of 8.00;
- EPC9, indicating „Technique unlearning”, with a multiplier value of 6.00;
- EPC11, indicating „Performance ambiguity”, with a multiplier value of 5.00;
- EPC12, indicating „Misperception of risk”, with a multiplier value of 4.00;
- EPC13, indicating „Poor feedback”, with a multiplier value of 4.00;
- EPC15, indicating „Operator inexperience”, with a multiplier value of 3.00;
- EPC21, indicating „Dangerous incentives”, with a multiplier value of 2.00;
- EPC26, indicating „Progress tracking lack”, with a multiplier value of 1.40.

The human error probability HEP parameter is used to determine the reliability of the operator R during the n -th task. The following formula (1) is used during the calculation:

$$R_n = 1 - HEP_n = 1 - (GEP_n \times \{\prod_i [(EPC_i - 1) APOE_i + 1]\}) \quad (1)$$

The value of the i -th EPC factor assigned to the n -th task is adjusted by an estimated value of the Assessed Proportion of Effect APOE weight, whose value must be between 0 and 1. The APOE value can be taken subjectively or determined using methods for solving multi-criteria problems. An example of a method that can be used to determine the APOE value is the multi-criteria Analytical Hierarchy Process AHP [37,38]. The procedure of the method involves collating the EPC factors at the individual operator tasks in terms of the overlap between them. The summary of the a_{ij} factors is represented as an $n \times n$ matrix, for which the relation (2) holds:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (2)$$

The w_i weight of the individual factor is calculated after performing the relevant transformations. Formula (3) is used in the calculation:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (3)$$

The correctness of the calculation is determined by the Consistency Ratio CR, which should not exceed 10%. The ratio is determined from the Index RI and the value of the Consistency Index CI. The RI is read from Saaty's table and depends on the number of factors n considered. For 3 factors, the RI is 0.58; for 4 factors 0.8; for 5 factors 1.12 and

so on [37,38]. The CI value is derived from the number of comparisons n and the eigenvector of the matrix λ_{max} . CR is calculated according to the following formula (4):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{RI} = \frac{(\frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j) - n}{RI} \quad (4)$$

4. Pilot reliability analysis

Determining the reliability of an unmanned aircraft pilot related to collision risk using the HEART method requires the adoption of an operations scenario. The assumptions adopted in the scenario enable the calculation of HEP values for individual pilot tasks, form the basis for task classification and for the identification of EPC factors present for each task. Table 2 shows the basic assumptions for the implementation of the reliability analysis.

Table 2

Basic assumptions for the HEART analysis

Aspect	Assumption
Operation	The operation aimed to take photographs and films of animals and natural landscapes for the promotion of the municipality. The operation will be carried out in the open A1/A3 subcategory, within sight of the pilot. The maximum altitude during the flight will not exceed 30 m AGL.
Pilot	An operator acting as a pilot will be responsible for the operation. The pilot completed the training and passed the the A1/A3 open subcategory online test. He has experience including flying approximately 4 h with an Autel Robotics EVO Lite + drone.
Place	The operation will be carried out over a forest area covering 1 km ² in Latowicz municipality, Mazowieckie voivodeship.
Time	The operation is scheduled to take place in the morning hours in June. The exact date of the flight will be determined based on the occurrence of favourable weather conditions.

According to the assumptions made, the operator performs the functions of the pilot, which means that he is responsible for the execution of all organizational and executive activities related to the operation. For the flight, it was envisaged to use the DJI Mavic 2 Pro drone, which was made available to the pilot solely to carry out the operation described in Table 2. The pilot's previous experience was gained from flying the Autel Robotics EVO Lite + drone. There are several differences between the devices, as indicated in Table 3. One of the differences found between the two drones is a different controller, which

enforces the need to get used to operating the device. This task is particularly challenging since the pilot is accustomed to another controller type [39,40].

Table 3

DJI and Autel Robotics drones comparison

Parameter	Mavic 2 Pro	EVO Lite +
Take-off weight [g]	907	835
Dimensions [mm]	322×242×84	427×384×95
Max Ascent Speed [m/s]	4	5
Max Wind Speed Resistance [m/s]	8 – 10.7	13.9 – 17.1
Max Hover Time [min]	29	38
Gimbal stabilization	3 – axial	4 – axial
Max Transmission Distance [km]	5	6

Based on the established assumptions, eight pilot tasks related to the possibility of a drone crash were identified. Each task’s type was determined according to the GTT table, and EPC factors were assigned along with APOE correction values. Table 4 shows the calculation assumptions for the variant of the implementation of the operation with the DJI Mavic 2 Pro drone.

Table 4

Assumptions for operations with a DJI Mavic 2 Pro

Task	GTT	EPC (APOE %)
Task 1. Familiarisation with the drone's operating instructions	C	EPC9 (45,02), EPC11 (25,02), EPC12 (16,97), EPC13 (8,72), EPC26 (4,27)
Task 2. Preparation of a checklist and emergency procedures.	D	EPC9 (45,19), EPC11 (28,07), EPC12 (11,05), EPC13 (11,29), EPC21 (4,40)
Task 3. Drone training flights.	D	EPC1 (44,03), EPC9 (24,76), EPC11 (18,14), EPC15 (9,00), EPC21 (4,08)
Task 4. Assessment of meteorological and health conditions permitting the operation.	G	EPC11 (39,77), EPC12 (28,36), EPC13 (18,41), EPC21 (8,47), EPC26 (4,99)
Task 5. Flight registration in the Droneradar system.	G	EPC7 (44,71), EPC11 (15,34), EPC12 (11,07), EPC13 (6,69), EPC21 (22,19)
Task 6. Assembly and assessment of the drone's condition and programming of safety functions.	C	EPC1 (47,14), EPC7 (23,07), EPC9 (13,09), EPC12 (10,16), EPC15 (6,55)
Task 7. Performing a drone test flight at the operation area.	C	EPC1 (47,52), EPC2 (22,37), EPC9 (14,90), EPC15 (9,63), EPC26 (5,59)
Task 8. Conducting a proper drone flight with due diligence.	C	EPC2 (47,27), EPC9 (21,74), EPC12 (9,50), EPC15 (15,51), EPC26 (5,98)

Based on the data in Table 4, pilot reliability calculations were performed during the execution of operations with the DJI Mavic 2 Pro drone. The results of the calculations indicated that the summary reliability was 0, which implies a very high risk for the correct execution of the operation, especially when emergencies occur. Excluding Tasks 4 and 5, in each case, the HEP value for the task exceeded a value of 1, indicating the certainty that the pilot would make errors during their execution. The main reason for the high probability of pilot unreliability is the pilot's lack of experience in using the DJI Mavic 2 Pro drone, translating into the types of GTTs assigned to the tasks and indicating in most of them the EPC9 factor corresponding to the pilot's unfamiliarity with the correct technique for performing the task, related to the need to unlearn old techniques. The presence of the EPC1 factor, related to unfamiliarity with a potentially important situation, occurring infrequently or constituting a novelty, and EPC15 concerning the experience possessed by the pilot, are also important for the result.

Increasing pilot reliability for the scenario under consideration can be achieved in two ways. The first option assumes that the pilot is trained in using the DJI Mavic 2 Pro drone, allowing for a change in task types and eliminating some of the EPC factors. The disadvantage of the proposed solution is that it is time-consuming, depending on the pilot's ability to assimilate new knowledge and master the skills to fly the DJI drone safely. The second option to improve reliability involves using the Autel Robotics EVO Lite + drone for operations, which will achieve analogous results in a shorter time. A repeat HEART analysis was performed for the modified assumptions to demonstrate the differences in pilot reliability:

- Task 1 were classified as type G and factors were distinguished EPC12 (APOE = 63.33%), EPC13 (APOE = 26.05%) oraz EPC26 (APOE = 10.62%),
- Task 2 were classified as type F and factors were distinguished EPC12 (APOE = 60.80%), EPC13 (APOE = 27.21%) oraz EPC21 (APOE = 11.99%),
- Task 3 were classified as type G without distinction of EPC factors,
- Task 6 were classified as type G and factors were distinguished EPC7 (APOE = 73.80%), EPC12 (APOE = 15.34%) oraz EPC13 (APOE = 11.07%),
- Task 7 were classified as type F and factors were distinguished EPC2 (APOE = 70.28%), EPC21 (APOE = 18.22%) oraz EPC26 (APOE = 11.49%),
- Task 8 were classified as type G and factors were distinguished EPC2 (APOE = 72.25%), EPC12 (APOE = 17.41%) oraz EPC26 (APOE = 10.33%).

The type of tasks 4 and 5 and the FTE factors occurring for them, have been retained from the previous calculation option.

5. Conclusions

The results of the calculations enabled the total probability of pilot reliability to be determined in the context of crash risk. The total pilot reliability for the comparative variant

using the Autel Robotics EVO Lite + drone was 0.93, representing a significant improvement over the variant envisaging the implementation of operations using the DJI Mavic 2 Pro drone. The pilot reliability results for each task are presented in Table 5. A graphical interpretation of the results is shown in Figures 1 and 2.

Table 5

Pilot reliability comparison

Task	DJI Mavic 2 Pro		Autel Robotics EVO Lite +	
	HEP	R1	HEP	R2
Task 1	2.02	-1.02	0.00	1.00
Task 2	1.16	-0.16	0.02	0.98
Task 3	3.43	-2.43	0.00	1.00
Task 4	0.00	1.00	0.00	1.00
Task 5	0.01	0.99	0.01	0.99
Task 6	8.72	-7.72	0.00	1.00
Task 7	9.48	-8.48	0.03	0.97
Task 8	3.30	-2.30	0.01	0.99

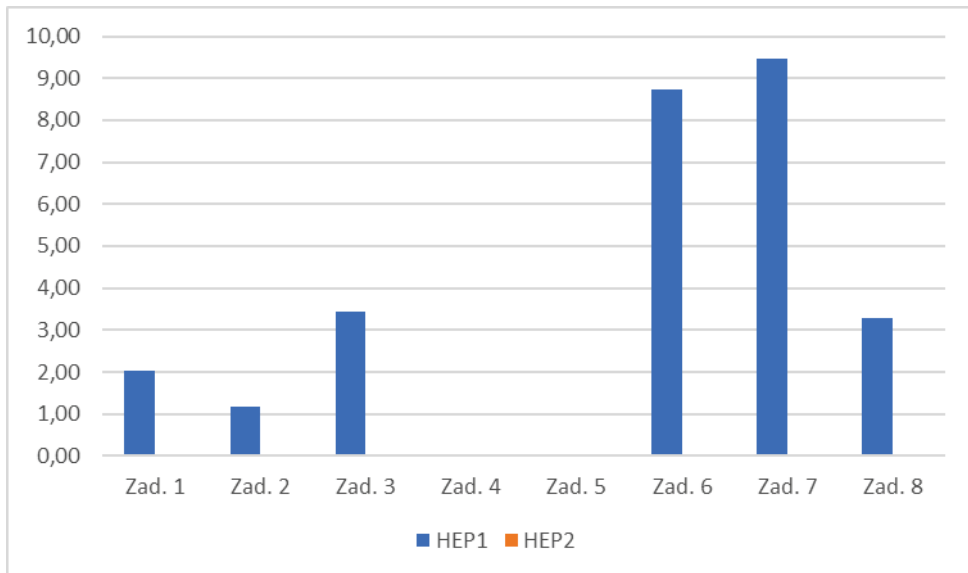


Fig. 1. Pilot HEP diagram using a DJI drone (HEP1) and Autel Robotics (HEP2)

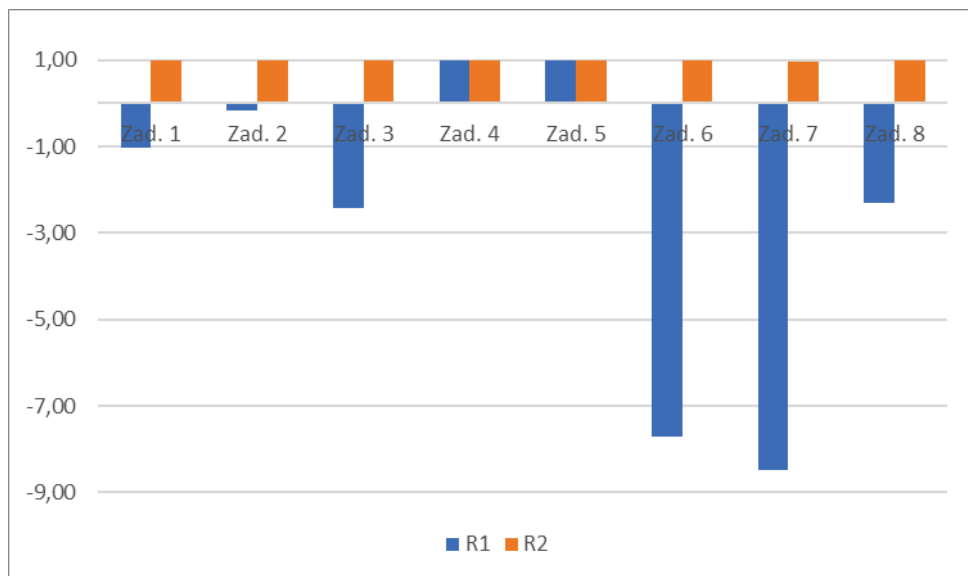


Fig. 2. Pilot reliability diagram using a DJI drone (R1) and Autel Robotics (R2)

Based on Figures 1 and 2 and Table 5, it can be concluded that in the first variant, assuming the use of a DJI Mavic 2 Pro drone, the probability of the pilot making an error resulting in a possible crash is exceptionally high. According to the results of the realized calculations, the HEP value for the first variant is higher than 1 due to the assumptions made in the calculations regarding the GEP, EPC and APOE values. The highest HEP values were calculated for tasks 6 and 7, respectively, during which the pilot performs drone flights. The results of the benchmarking analysis for using the Autel Robotics EVO Lite + drone in operation indicate that the pilot's reliability increases significantly. This is due to the pilot's experience in handling the drone, so the probability of an error leading to a crash is reduced considerably.

6. Summary

Reliability is an essential characteristic of technical systems, which defines their ability to function correctly over time. Moreover, reliability plays a crucial role in safe operation of machinery and equipment, as failures can generate negative consequences that might affect human health and life. One of the determinants influencing the level of reliability is the correct execution of tasks conducted by personnel.

Literature analysis has shown that the possibility of an unmanned aircraft crash is a significant problem, which increases along with the intensification of drone use. This dilemma can be understood as a risk to human health and life and in the context of

generating material losses during collisions with infrastructure objects, other vehicles or natural world. The collision of an unmanned aircraft poses a safety risk, and the scale of the risk depends on the size of the drone, mission location, correct organization of the operation, proper flight planning or the skills and experience of the pilot in performing a particular mission or using a given drone.

The number of crashes can be reduced by implementing organizational and technical measures aimed at increasing the safety level of people, other flying objects, environment elements and infrastructure. Safety enhancement is achieved through separating flight zones, using detection and neutralization systems, or introducing categories of operations and authorizations for pilots. Safety-enhancing solutions also include obstacle detection and avoidance systems. With the correct performance of the UAV mission, a pilot has an impact on avoiding a crash.

An analysis of pilot reliability using the HEART method indicated that there are several factors determining the level of pilot reliability affecting crash risk. The experience possessed by the pilot, related to the operation of a specific device, is of main significance. The assumptions in the calculations made it possible to conclude that the probability of an error creating a crash risk is certain when a pilot uses a drone to which he is not used. A method was proposed to minimize the risk related to applying for a mission a drone that the pilot had already operated. The pilot's experience and skills are key factors contributing to the correct operation planning, correct preparation of the unmanned aircraft and safe flight.

7. References

1. M. Lorek and M. Magniszewski, "The use of unmanned aerial vehicles by the Polish police". *Journal of Security and Sustainability Issues*, 11, 481-488, 2021. DOI 10.47459/jssi.2021.11.43
2. S.A.H. Mohsan, M.A. Khan, F. Noor, I. Ullah and M.H. Alsharif, "Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review". *Drones*, 6, 147, 2022. DOI 10.3390/drones6060147
3. G. Singhal, B. Bansod and L. Mathew, "Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review". Preprints, 2018110601, 2018. DOI 10.20944/preprints201811.0601.v1.
4. RPAS. Remotely Piloted Aircraft Systems. The Global Perspective, 15th Annual Edition (October 2018) Available: https://rps-info.com/publications_old-page/rpas-yearbook-2018/#page/1 (accessed on December 01, 2022).
5. S. Agostino, M. Mammone, M. Nelson, T. Zhou, "Classification of Unmanned Aerial Vehicles Aeronautical Engineering", Mechanical Engineering 3016, The University of Adelaide, 2007.
6. K. Balcer, "Classification of unmanned aerial vehicles in relation to the specifications and provisions of Polish and international law", *Developments In Mechanical Engineering*, 17(9), 2021. DOI: 10.37660/dme.2021.17.9.1

7. A. Michalska, "Introduction to Reliability Tests of Unmanned Aircraft Used in the Armed Forces of the Republic of Poland. *Safety & Defense*, 5(2), 54-61, 2019. DOI 10.37105/sd.57.
8. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (*Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 152/45).
9. Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) 2020/1058 z dnia 27 kwietnia 2020 r. zmieniające rozporządzenie delegowane (UE) 2019/945 w odniesieniu do wprowadzenia dwóch nowych klas systemów bezzałogowych statków powietrznych (*Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 232/1), Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1058&from=PL> (accessed on December 6, 2022).
10. G.E.M. Abro, S.A.B.M. Zulkifli, R.J. Masood, V.S. Asirvadam and A. Laouti, „Comprehensive Review of UAV Detection, Security, and Communication Advancements to Prevent Threats”. *Drones*, 6, 284, 2022. <https://doi.org/10.3390/drones6100284>.
11. M. Feltynowski and M. Zawistowski, „Zagrożenia związane z wykorzystaniem bezzałogowych platform w służbach ratunkowo-porządkowych. *BITP VOL. 51 ISSUE 3*, pp. 138–149, 2018. DOI 10.12845/bitp.51.3.2018.10.
12. A. Konert, „Odpowiedzialność operatora bezzałogowego statku powietrznego za opóźnienie lub odwołanie lotu”, *Ius Novum*, 1, 2021. DOI: 10.26399/iusnovum.v15.1.2021.09/a.konert.
13. J. Łukasiewicz, „Bezzałogowe statki powietrzne jako źródło zagrożeń infrastruktury zaopatrzenia państw w energię elektryczną oraz proponowane metody ochrony tej infrastruktury”, *Terroryzm. Studia, analizy, prewencje*, 1(1), s. 90 – 122, 2022. DOI: 10.4467/27204383TER.22.004.15420.
14. G. Pietrek and M. Pietrek, „Bezzałogowe statki powietrzne jako zagrożenie dla infrastruktury krytycznej państwa”, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 83, s. 163 – 174, 2022. DOI: 10.5604/01.3001.0016.0230
15. G. Hansen, F. Zeller and R. Austin, “Reliability of UAVs and Drones”, *DSIAC Journal*, Vol. 4, No. 2, Spring 2017. Available: <https://dsiac.org/wp-content/uploads/2020/05/dsiac-spring-2017-volume-4-number-2.pdf> (accessed on December 19, 2022).
16. M. Krawczyk, “Conditions for unmanned aircraft reliability determination”. *Eksploatacja i Niezawodność*, t. 15, nr 1, Polska Akademia Nauk. Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne PAN, s. 31–36, 2013.
17. M. Krawczyk, „Niezawodność polskich samolotów bezpilotowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*; (3 (224)):52–62, 2012.
18. C. Lum, D. Tsukada, “UAS Reliability and Risk Analysis”, 2016. DOI: 10.1002/9780470686652.eae1148.
19. E. Petritoli, F. Leccese and L. Ciani, “Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles”. *Sensors*; 18(9):3171, 2018. DOI: 10.3390/s18093171.

20. E. Balestrieri, P. Daponte, L. De Vito, F. Picariello, I. Tudosa, "Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview". *Sensors*, 21, 8253, 2021. DOI: 10.3390/s21248253.
21. L. Cwojdzński, J. Lewitowicz and A. Żyluk, „Kolizje bezałogowych statków powietrznych z załogowymi statkami powietrznymi”, *Journal of KONBiN*, 2(22), 2012. DOI: 10.2478/jok-2013-0017.
22. https://www.pansa.pl/uas_geozones/ (accessed on December 15, 2022).
23. <https://www.pansa.pl/asml/know-how/> (accessed on December 15, 2022).
24. Wytyczne nr 17/2023 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 6 czerwca 2023 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezałogowych statków powietrznych (Dz. U. z 2023 r., poz. 42).
25. G. Jaromi, D. Kordos, T. Rogalski, P. Rzucidło and P. Szczerba, „Selected test elements of the vision anti-collision system for light and unmanned aerial vehicles”. *Autobusy–Tech. Eksploat. Syst. Transp.*, 227, 265–271, 2019. DOI: 10.24136/atest.2019.048.
26. P. Rzucidło, G. Jaromi, T. Kapuściński, D. Kordos, T. Rogalski and P. Szczerba, „In-Flight Tests of Intruder Detection Vision System”. *Sensors*, 21, 7360, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21217360>.
27. P. Rzucidło, T. Rogalski, G. Jaromi, D. Kordos, P. Szczerba and A. Paw, “Simulation studies of a vision intruder detection system”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 92 No. 4, pp. 621-631, 2020. DOI: 10.1108/AEAT-04-2019-0065.
28. J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman and A. Chehab, “Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations Internet Things”, 11, Article 100218, 2020. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
29. V. Chamola, P. Kotes, A. Agarwal, Naren, N. Gupta and M. Guizani, “A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques”, *Ad Hoc Networks*, Vol. 111, 102324, 2021. DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102324.
30. H. Kang, J. Joung, J. Kim, J. Kang and Y.S. Cho, “Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems”, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 168671-168710, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473.
31. M. Tkacz, „Bezałogowe statki powietrzne jako źródło zagrożeń dla ruchu lotniczego”, *Przegląd Policyjny*, 134(2), 233-248, 2019. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7439.
32. A.C. Ogmen and I. Ekmekci, HEART Hybrid Methods for Assessing Human Reliability in Coal-Fired Thermal Power Plant Process. *Sustainability*, 14, 10838, 2022. DOI: 10.3390/su141710838.
33. N. Sembiring, M.M. Tambunan and M. Febriani, “Human error analysis on production process of door products with SHERPA and HEART method”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/505/1/012025.

34. J.C. Williams, "Heart – A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology", *Safety and Reliability*, 35:3, 5-25, 2015. DOI: 10.1080/09617353.2015.11691046.
35. J.C. Williams, J.L. Bell, "Consolidation of the Error Producing Conditions Used in the Human Error Assessment and Reduction Technique (Heart)", *Safety and Reliability*, 35:3, 26-76, 2015. DOI: 10.1080/09617353.2015.11691047.
36. "Human Error Assessment & Reduction Technique (HEART)", https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_2242014/EIA/app/app12.10.pdf (accessed on January 3, 2023).
37. E. Akyuz, M. Celik, "A methodological extension to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships", *Saf. Sci.*, 75, pp. 146-155, 2015. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.008.
38. A. Petruni, E. Giagloglou, E. Douglas, J. Geng, M.C. Leva and M. Demichela, "Applying Analytic Hierarchy Process (AHP) to choose a human factors technique: Choosing the suitable Human Reliability Analysis technique for the automotive industry", *Saf Sci*, Vol. 119, 2019. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.05.007.
39. Podręcznik Użytkowania DJI Mavic 2 Pro/Zoom, Available: <https://dji-ars.pl/media/instrukcje/dji-mavic-2.pdf>.
40. User Manual EVO Lite Series, Available: <https://www.vertigodrones.com/assets/images/EVO%20Lite%20Series%20User%20Manual%20-%20EN.pdf>.

WPLYW NIEZAWODNOŚCI PILOTA NA PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYSTĄPIENIA ZDERZENIA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne, nazywane również dronami, odgrywają duże znaczenie dla funkcjonowania współczesnego świata. Urządzenia te znajdują szerokie zastosowanie w obszarach militarnych oraz cywilnych, w tym na potrzeby zapewnienia rozrywki. Drony są wykorzystywane podczas wykonywania zdjęć i filmów, do prowadzenia obserwacji i monitoringu, realizacji procesów transportowych, prowadzenia akcji ratunkowych, wykonywania oprysków i precyzyjnego rolnictwa oraz wielu innych działań [1–4]. Na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań, które różnią się wymiarami, masą, zasięgiem, maksymalnym pułapem, sposobem startowania, odpornością na warunki atmosferyczne czy zainstalowanym oprzyrządowaniem.

Jednym z podstawowych kryteriów podziału dronów jest masa. Opiera się na niej wiele wariantów klasyfikacji, a także od masy drona zależy konieczność posiadania przez użytkownika stosownych uprawnień czy obowiązku rejestracji lotu. Obowiązujące w państwach Unii Europejskiej przepisy wskazują, że drony o masie powyżej 0,25 kg muszą być używane przez pilotów, którzy ukończyli kurs oraz zdali test online. Podział użytkowników bezzałogowych statków powietrznych na profesjonalistów i amatorów na podstawie posiadanych uprawnień może nie być do końca trafny. Profesjonaliści mogą być upoważnieni do działania w określonej lub certyfikowanej kategorii, podczas gdy osoby uważane za pilotów-amatorów mogą być kompetentne do latania w kategorii otwartej, w której można latać dronami o wadze do 25 kg, zachowując wymaganą prawem odległość od ludzi. Oznacza to trudność w przyporządkowaniu pilotów do grupy profesjonalistów bądź amatorów [1,5–9].

Nieustannie rosnący zakres zastosowania oraz powszechny dostęp do dronów generuje szereg zagrożeń, dotyczących różnego rodzaju obszarów. Za najważniejsze niebezpieczeństwo należy uznać stwarzanie zagrożenia zakłóceń w ruchu powietrznym, powodowane naruszeniami stref, brak pozyskiwania zezwoleń na operację czy nieodpowiedzialnym zachowaniem pilota. Innymi zagrożeniami wynikającymi z użytkowania bezzałogowych statków powietrznych jest możliwość wykorzystania ich do działań terrorystycznych lub przestępczych. Niezwykle istotnym niebezpieczeństwem jest

stwarzanie zagrożenia spowodowania kolizji, która w dużym stopniu wpływa na bezpieczeństwo ludzi, środowiska naturalnego oraz elementów infrastruktury [10–14].

Głównym celem pracy była analiza niezawodności pilota bezzałogowego statku powietrznego dla dwóch wariantów scenariuszy operacji. Różnicę pomiędzy rozpatrywanymi wariantami stanowił poziom doświadczenia pilota w użytkowaniu konkretnego modelu drona. Pierwszy wariant zakładał wykorzystanie drona, z którym pilot nie miał wcześniej do czynienia, natomiast drugi – użycie drona, którym pilot odbył już lot wcześniej. Otrzymane wyniki zostały ze sobą porównane.

2. Zderzenia bezzałogowych statków powietrznych

Istotnym elementem bezpieczeństwa stosowania bezzałogowych statków powietrznych jest niezawodność poszczególnych komponentów całego systemu. Do głównych elementów bezzałogowego systemu powietrznego należy zaliczyć drona oraz wyposażenie umożliwiające zdalne sterowanie urządzeniem. Przeprowadzenie lotu wymaga zastosowania odpowiednich procedur realizacji operacji oraz zaangażowania osób, odpowiadających za organizację oraz przeprowadzenie lotu. Prawidłowe funkcjonowanie wszystkich komponentów warunkuje poprawne i bezpieczne zrealizowanie operacji. Kluczowe znaczenie ma odpowiednie zachowanie personelu, który powinien mieć odpowiednie kompetencje i umiejętności do wykonania poszczególnych czynności związanych z przygotowaniem do operacji drona, aparatury oraz samym wykonaniem lotu [10,15-19]. Głównymi czynnikami ryzyka, które mogą przełożyć się na wystąpienie zderzenia są:

- błędy popełnione przez pilota podczas realizowania operacji,
- nieprawidłowe wykonywanie czynności obsługowych oraz przygotowawczych do lotu,
- uszkodzenia podsystemów drona oraz jego wyposażenia,
- zakłócenia w komunikacji pomiędzy urządzeniem a stacją sterującą,
- niekorzystne oddziaływanie pogody,
- nagle, nieprzewidziane pojawienie się przeszkody na trasie lotu BSP.

Zderzenia bezzałogowych statków powietrznych mogą być klasyfikowane na różne sposoby, uwzględniające różne aspekty kolizji. Dokonując podziału ze względu na etap operacji, wyróżnia się zderzenia podczas startu, wykonywania lotu oraz podczas lądowania. Rozpatrując zagadnienie ze względu na czynnik powodujący, rozróżniane są zderzenia spowodowane nieprawidłowym zachowaniem pilota (np. błędne zaprogramowanie urządzenia, nieuważna obserwacja otoczenia), zderzenia spowodowane niesprawnym działaniem drona (np. układu zasilania, układu napędowego) lub ze względu na oddziaływanie czynników zewnętrznych (np. złe warunki pogodowe, niespodziewane pojawienie się innego obiektu na trasie lotu). Zderzenie w powietrzu może obejmować uderzenie w inny statek powietrzny (załogowy lub bezzałogowy), w ptaki lub w obiekty

budowlane lub elementy infrastruktury (budynki, budowle, obiekty liniowe oraz obiekty małej architektury). Osobne zagadnienie stanowią zderzenia spadających dronów, które mogą uderzyć człowieka. Skutki zderzenia można natomiast podzielić na osobowe oraz ekonomiczne [16, 17, 20].

W celu minimalizacji wystąpienia zderzenia bezzałogowego statku powietrznego stosuje się różnorodne środki. Za najważniejsze należy uznać rozwiązania o charakterze prawno-organizacyjnym oraz rozwiązania techniczne, do których zalicza się systemy i układy bezpieczeństwa dronów oraz systemy detekcji i neutralizacji bezzałogowych statków powietrznych [13, 21–23]. Środki prawne ograniczające zagrożenie zderzeń obejmują przepisy nakładające obowiązek ukończenia szkolenia przez pilotów, przepisy nakładające obowiązek rejestracji lotów i wydzielające strefy ruchu lotniczego oraz przepisy związane z systemami bezpieczeństwa, w jakie muszą być wyposażone wprowadzane na rynek rozwiązania [8, 24].

Instalowane w dronach systemy bezpieczeństwa ograniczające prawdopodobieństwo zderzenia, obejmują pozycjonowanie urządzenia podczas lotu oraz detekcję przeszkód. Minimalizowanie skutków spowodowanych zderzeniem jest również ograniczane poprzez stosowanie osłon elementów ruchomych, które w momencie uderzenia mogą wywołać obrażenia u ludzi. Osobną grupę stanowią informatyczne systemy antykolizyjne ACAS (ang. Airborne Collision Avoidance System) oraz systemy separacji powietrznej ASAS (ang. Airborne Separation Assurance System). Wskazane systemy wykorzystują algorytmy obliczeniowe do wykrywania obecności statków powietrznych stwarzających zagrożenie kolizją oraz inicjowania manewrów, które mają na celu jego zażegnanie [25–28].

Wpływ na ograniczanie zagrożenia zderzeń mają również systemy detekcji oraz neutralizacji bezzałogowych statków powietrznych. Systemy te są wykorzystywane do zapewniania ochrony obiektów o szczególnym znaczeniu, do których należy zaliczyć obiekty infrastruktury krytycznej czy lotniska. Podczas detekcji stosowane są rozwiązania oparte na technikach audio (wykrywanie hałasu emitowanego przez drona), technikach wizyjnych (rozpoznanie obiektu ruchomego na tle otoczenia), na wykrywaniu fal radiowych (identyfikacja komunikacji pomiędzy dronem a aparaturą sterującą) oraz wykorzystujące radary. Do neutralizacji drona wykorzystuje się metody kinetyczne (sieci, ptaki drapieżne, broń palna, drony przechwytyjące) oraz środki niekinetyczne (przejmowanie kontroli, zakłócanie sterowania, lasery nagrzewające, działa elektromagnetyczne). Wadą większości rozwiązań stosowanych do neutralizacji bezzałogowych statków powietrznych jest spowodowanie niekontrolowanego upadku drona na ziemię. Zagadnienie to jest istotne z tego względu, że trudno jest oszacować rzeczywiste skutki strącenia drona, jakimi mogą być zderzenie z obiektami znajdującymi się na ziemi [11, 13, 29–31].

3. Metodyka badań własnych

Analiza niezawodności operatora systemu technicznego może zostać przeprowadzona różnymi metodami i technikami pomiarowymi. Opracowana w 1985 r. przez J.C. Williamsa metoda HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique) służy do wyznaczania prawdopodobieństwa wystąpienia błędu ludzkiego podczas zadań wykonywanych przez operatora urządzenia. Metoda umożliwia stosunkowo prostą i szybką ocenę niezawodności czynnika ludzkiego w poprawnej realizacji procesu [32–36].

Tablicę GTT przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Tablica zadań GTT

Kod	Rodzaj zadania	GEP
A	Zadanie nieznanne, wykonywane w pośpiechu przy braku świadomości jego skutków.	0,55
B	Przywrócenie stanu lub spowodowanie nowego stanu systemu bez nadzoru lub użycia procedur.	0,26
C	Złożone zadanie wymagające skomplikowanego rozumowania lub dużej zręczności.	0,16
D	Prostsze zadanie, ale wykonywane szybko lub z niedostateczną uwagą.	0,09
E	Rutynowe, dobrze opanowane zadanie niewymagające dużej zręczności.	0,02
F	Przywrócenie lub spowodowanie nowego stanu systemu według procedur lub pod nadzorem.	0,003
G	Rutynowe, dobrze opanowane zadanie wykonywane przez osobę dobrze wyszkoloną.	0,0004
H	Reakcja na sygnał z systemu automatycznego nadzoru z dokładnym opisem stanu systemu.	0,00002
M	Inne zadania wykonywane bez znajomości ich opisu.	0,03

Analiza niezawodności HEART polega na określeniu scenariusza działań wykonywanych przez operatora urządzenia oraz ich przyporządkowaniu do właściwego rodzaju według tablicy zadań ogólnych GTT (ang. Generic Task Types), wskazującej nominalną wartość błędu GEP (ang. Generic Error Potential).

Następnym krokiem jest przypisanie każdego zidentyfikowanego zadania operatora odpowiednich czynników wpływających na powstanie błędu EPC (ang. Error Producing Conditions). Wyróżnianych jest 40 czynników EPC z określonymi wartościami mnożników. Do przykładowych czynników EPC należą:

- EPC1, oznaczający nieznaną potencjalnie ważną sytuację, występującą rzadko lub stanowiącą nowość, o wartości mnożnika 17,00;

- EPC2, oznaczający krótki czas na wykrycie błędu oraz jego poprawę, o wartości mnożnika 11,00;
- EPC7, oznaczający brak oczywistych sposobów odwrócenia niezamierzonego działania, o wartości mnożnika 8,00;
- EPC9, oznaczający niezajomość właściwej techniki wykonywania zadania przez operatora, związaną z koniecznością oduczenia starych technik, o wartości mnożnika 6,00;
- EPC11, oznaczający niejednoznaczność w wymaganych standardach wydajności, o wartości mnożnika 5,00;
- EPC12, oznaczający błędne rozpoznanie ryzyka, o wartości mnożnika 4,00;
- EPC13, oznaczający niezgodność między postrzeganym a rzeczywistym ryzykiem, o wartości mnożnika 4,00;
- EPC15, oznaczający brak odpowiedniego doświadczenia pracownika, o wartości mnożnika 3,00;
- EPC21, oznaczający zachęcanie do stosowania procedur wykazujących niższy poziom bezpieczeństwa, o wartości mnożnika 2,00;
- EPC26, oznaczający brak oczywistego sposobu śledzenia postępów w trakcie działania, o wartości mnożnika 1,40.

Do określania niezawodności operatora R podczas realizacji n -tego zadania wykorzystywany jest parametr zawodności człowieka HEP (ang. Human Error Probability). Podczas obliczeń stosowany jest wzór (1):

$$R_n = 1 - HEP_n = 1 - (GEP_n \times \{\prod_i [(EPC_i - 1) APOE_i + 1]\}) \quad (1)$$

Wartość i -tego czynnika EPC, przypisanego do n -tego zadania, jest korygowana o szacunkową wartość wagi wpływu APOE (ang. Assessed Proportion of Effect), którego wartość musi mieścić się w przedziale od 0 do 1. Wartość APOE może zostać przyjęta subiektywnie lub wyznaczona metodami do rozwiązywania problemów wielokryterialnych. Przykład metody, która może zostać zastosowana do wyznaczenia wartości APOE, stanowi wielokryterialna analiza hierarchiczna AHP (ang. Analytical Hierarchy Process) [37, 38]. Procedura metody zakłada zestawienie czynników EPC przy poszczególnych zadaniach operatora pod kątem występującej między nimi nadrzędności. Zestawienie czynników a_{ij} jest przedstawiane w postaci macierzy o wymiarach $n \times n$, dla której zachodzi zależność (2):

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (2)$$

Obliczenie wagi w_i poszczególnego czynnika obliczane jest po wykonaniu stosownych przekształceń. Podczas kalkulacji stosowany jest wzór (3):

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (3)$$

Poprawność obliczeń jest określana wskaźnikiem niezgodności CR (ang. Consistency Ratio), który nie powinien przekraczać 10%. Wskaźnik jest wyznaczany na podstawie losowego indeksu zgodności RI (ang. Random Index) oraz wartości współczynnika zgodności CI (ang. Consistency Index). RI jest odczytywane z tabeli Saaty'ego i zależy od liczby rozpatrywanych czynników n . Dla trzech czynników RI wynosi 0,58, dla czterech – 0,89, dla pięciu – 1,12 itd. [37,38]. Wartość CI wynika z liczby porównań n oraz wektora własnego macierzy λ_{max} . CR jest obliczane zgodnie ze wzorem (4):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\frac{\lambda_{max} - n}{n-1}}{\frac{(\frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j) - n}{n-1}} \quad (4)$$

4. Analiza niezawodności pilota

Wyznaczenie niezawodności pilota bezzałogowego statku powietrznego związanej z ryzykiem wystąpienia zderzenia przy użyciu metody HEART wymaga przyjęcia scenariusza realizacji operacji. Przyjęte w scenariuszu założenia umożliwiają wykonanie obliczeń wartości HEP dla poszczególnych zadań realizowanych przez pilota, stanowią podstawę klasyfikacji zadań oraz do wskazania czynników EPC występujących dla każdego zadania. Tabela 2 przedstawia podstawowe założenia do realizacji analizy niezawodności.

Tabela 2

Założenia podstawowe do analizy

Aspekt	Założenie
Operacja	Celem operacji było wykonanie zdjęć oraz filmów zwierząt oraz krajobrazów przyrodniczych na potrzeby promocji gminy. Operacja będzie wykonywana w podkategorii otwartej A1/A3, w zasięgu wzroku pilota. Maksymalna wysokość podczas lotu nie będzie przekraczać wysokości 30 m AGL.
Pilot	Za realizację operacji będzie odpowiedzialny operator pełniący funkcje pilota. Pilot ukończył szkolenie i zaliczył test online dla podkategorii otwartej A1/A3. Pilot posiada doświadczenie obejmujące wylatanie ok. 4 h dronem Autel Robotics EVO Lite +.
Miejsce	Operacja zostanie zrealizowana nad terenem leśnym obejmującym 1 km ² , zlokalizowanym na obszarze gminy Latowicz, województwo mazowieckie.
Czas	Realizację operacji przewidziano w godzinach porannych, w czerwcu. Dokładny termin wykonania lotu będzie wyznaczony na podstawie prognozowanych dogodnych warunków pogodowych.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, operator pełni funkcje pilota, co oznacza że odpowiada on za realizację wszelkich czynności organizacyjnych i wykonawczych

związanych z operacją. Przewidziano użycie drona DJI Mavic 2 Pro, który został udostępniony pilotowi wyłącznie na potrzeby realizacji operacji opisanej w tabeli 2. Dotychczasowe doświadczenie pilota zostało zdobyte w czasie lotów dronem Autel Robotics EVO Lite +. Pomędzy urządzeniami występuje wiele różnic, wskazanych w tabeli 3. Jedną z różnic jest też inny kontroler sterujący, co przekłada się na konieczność przyzwyczajenia pilota do obsługi urządzenia. Zadanie to jest szczególnie trudne, ponieważ pilot jest przyzwyczajony do innego typu kontrolera [39,40].

Tabela 3

Porównanie DJI oraz Autel Robotics

Parametr	Mavic 2 Pro	EVO Lite +
Masa startowa [g]	907	835
Wymiary [mm]	322×242×84	427×384×95
Maks. prędkość wznoszenia [m/s]	4	5
Odporność na wiatr [m/s]	8 – 10,7	13,9 – 17,1
Maks. czas zawisu [min]	29	38
Stabilizacja gimbała	3-osiowa	4-osiowa
Maksymalny zasięg sygnału [km]	5	6

Na podstawie przyjętych założeń zidentyfikowano osiem zadań pilota, związanych z możliwością wystąpienia zderzenia drona. Dla każdego zadania określono jego rodzaj według tablicy GTT oraz przyporządkowano czynniki EPC wraz wartościami korygującymi APOE. Tabela 4 przedstawia założenia do obliczeń dla wariantu realizacji operacji z użyciem drona DJI Mavic 2 Pro.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 4 wykonano obliczenia niezawodności pilota podczas realizacji operacji z użyciem drona DJI Mavic 2 Pro. Wyniki kalkulacji wskazały, że sumaryczna niezawodność wynosi 0, co oznacza bardzo wysokie ryzyko dla poprawnego wykonania operacji, szczególnie w momencie wystąpienia sytuacji awaryjnych. Z wyłączeniem zadań 4 i 5, w każdym wypadku wartość HEP dla zadania przekraczała wartość 1, co oznacza pewność popełnienia przez pilota błędów podczas ich realizowania. Główną przyczynę wysokiego prawdopodobieństwa zawodności pilota stanowi jego brak doświadczenia w użytkowaniu drona DJI Mavic 2 Pro, przekładający się na rodzaje GTT przypisane do zadań oraz wskazywanie w większości z nich czynnika EPC9 odpowiadającego nieznajomości właściwej techniki wykonywania zadania przez pilota, związanej z koniecznością oduczenia starych technik. Istotne znaczenie dla wyniku ma również występowanie czynnika EPC1, związanego z nieznajomością potencjalnie ważnej sytuacji występującej rzadko lub stanowiącej nowość oraz EPC15 dotyczącego doświadczenia posiadanego przez pilota.

Tabela 4

Dane do operacji z dronem DJI Mavic 2 Pro

Zadanie	GTT	EPC (APOE %)
Zadanie 1. Zapoznanie z instrukcją obsługi drona.	C	EPC9 (45,02), EPC11 (25,02), EPC12 (16,97), EPC13 (8,72), EPC26 (4,27)
Zadanie 2. Opracowanie listy kontrolnej oraz procedur postępowania w sytuacjach awaryjnych.	D	EPC9 (45,19), EPC11 (28,07), EPC12 (11,05), EPC13 (11,29), EPC21 (4,40)
Zadanie 3. Wykonanie lotów treningowych dronem.	D	EPC1 (44,03), EPC9 (24,76), EPC11 (18,14), EPC15 (9,00), EPC21 (4,08)
Zadanie 4. Ocena warunków meteorologicznych oraz zdrowotnych dopuszczająca do realizacji operacji.	G	EPC11 (39,77), EPC12 (28,36), EPC13 (18,41), EPC21 (8,47), EPC26 (4,99)
Zadanie 5. Rejestracja lotu w systemie Droneradar.	G	EPC7 (44,71), EPC11 (15,34), EPC12 (11,07), EPC13 (6,69), EPC21 (22,19)
Zadanie 6. Montaż i ocena stanu drona oraz zaprogramowanie funkcji bezpieczeństwa.	C	EPC1 (47,14), EPC7 (23,07), EPC9 (13,09), EPC12 (10,16), EPC15 (6,55)
Zadanie 7. Wykonanie lotu testowego dronem w miejscu realizacji operacji.	C	EPC1 (47,52), EPC2 (22,37), EPC9 (14,90), EPC15 (9,63), EPC26 (5,59)
Zadanie 8. Przeprowadzenie właściwego lotu dronem z zachowaniem należytej staranności.	C	EPC2 (47,27), EPC9 (21,74), EPC12 (9,50), EPC15 (15,51), EPC26 (5,98)

Zwiększenie niezawodności pilota w przypadku rozpatrywanego scenariusza może zostać osiągnięte na dwa sposoby. Pierwszy wariant zakłada trenowanie przez pilota umiejętności użytkowania drona DJI Mavic 2 Pro, co umożliwi zmianę rodzajów zadań oraz wyeliminuje część czynników EPC. Wadą zaproponowanego rozwiązania jest jego czasochłonność, uzależniona od zdolności pilota do przyswajania nowej wiedzy oraz opanowania umiejętności bezpiecznego latania dronem DJI. Drugi wariant poprawy niezawodności zakłada użycie do operacji drona Autel Robotics EVO Lite +, co pozwoli na osiągnięcie analogicznych efektów w krótszym czasie. W celu wykazania różnic w niezawodności pilota wykonano ponową analizę HEART dla zmodyfikowanych założeń:

- Zadanie 1 zaliczono do rodzaju G i wyróżniono czynniki EPC12 (APOE = 63,33%), EPC13 (APOE = 26,05%) oraz EPC26 (APOE = 10,62%),
- Zadanie 2 zaliczono do rodzaju F i wyróżniono czynniki EPC12 (APOE = 60,80%), EPC13 (APOE = 27,21%) oraz EPC21 (APOE = 11,99%),
- Zadanie 3 zaliczono do rodzaju G, bez wskazywania czynników EPC,
- Zadanie 6 zaliczono do rodzaju G i wyróżniono czynniki EPC7 (APOE = 73,80%), EPC12 (APOE = 15,34%) oraz EPC13 (APOE = 11,07%),

- Zadanie 7 zaliczono do rodzaju F i wyróżniono czynniki EPC2 (APOE = 70,28%), EPC21 (APOE = 18,22%) oraz EPC26 (APOE = 11,49%),
- Zadanie 8 zaliczono do rodzaju G i wyróżniono czynniki EPC2 (APOE = 72,25%), EPC12 (APOE = 17,41%) oraz EPC26 (APOE = 10,33%).

Rodzaj zadań 4 i 5, a także występujące dla nich czynniki EPC zostały zachowane z poprzedniego wariantu obliczeniowego.

5. Wnioski

Wyniki kalkulacji umożliwiły wyznaczenie całkowitego prawdopodobieństwa niezawodności pilota w kontekście ryzyka wystąpienia zderzenia. Całkowita niezawodność pilota dla wariantu porównawczego z użyciem drona Autel Robotics EVO Lite + wyniosła 0,93, co oznacza znaczną poprawę względem wariantu przewidującego realizację operacji z użyciem drona DJI Mavic 2 Pro. Wyniki niezawodności pilota dla poszczególnych zadań przedstawiono w tabeli 5. Graficzna interpretacja wyników została przedstawiona na rys. 1 i 2.

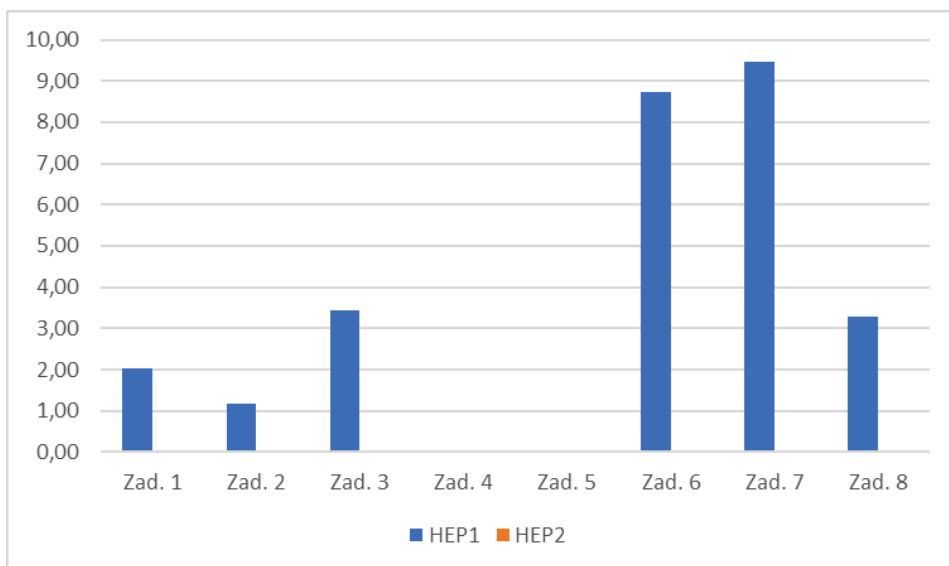
Tabela 5

Porównanie niezawodności pilota

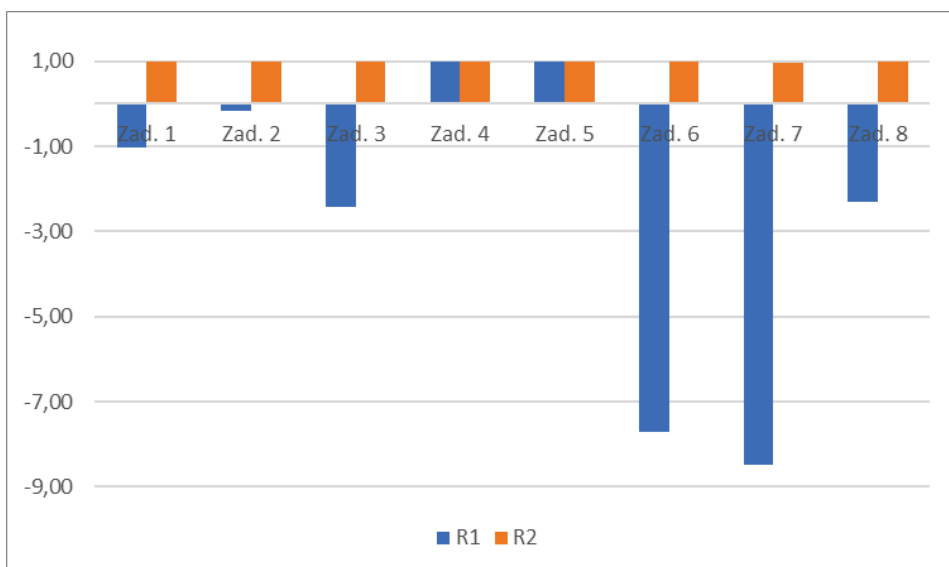
Zadanie	DJI Mavic 2 Pro		Autel Robotics EVO Lite +	
	HEP1	R1	HEP1	R2
Zadanie 1	2,02	-1,02	0,00	1,00
Zadanie 2	1,16	-0,16	0,02	0,98
Zadanie 3	3,43	-2,43	0,00	1,00
Zadanie 4	0,00	1,00	0,00	1,00
Zadanie 5	0,01	0,99	0,01	0,99
Zadanie 6	8,72	-7,72	0,00	1,00
Zadanie 7	9,48	-8,48	0,03	0,97
Zadanie 8	3,30	-2,30	0,01	0,99

Na podstawie rys. 1 i 2 oraz tabeli 5 można stwierdzić, że w pierwszym wariancie, zakładającym zastosowanie drona DJI Mavic 2 Pro, prawdopodobieństwo popełnienia przez pilota błędu skutkującego możliwością zderzenia jest niezwykle wysokie. Zgodnie z wynikami zrealizowanych obliczeń wartość HEP dla pierwszego wariantu jest wyższa od 1, co wynika z przyjętych w kalkulacjach założeń dotyczących wartości GEP, EPC oraz APOE. Najwyższe wartości HEP zostały obliczone odpowiednio dla zadań 6 oraz 7, podczas których pilot wykonuje loty dronem. Wyniki analizy porównawczej dla

zastosowania w operacji drona Autel Robotics EVO Lite + wskazują, że niezawodność pilota znacząco rośnie. Wynika to z doświadczenia pilota w obsłudze drona, dzięki czemu prawdopodobieństwo popełnienia błędu prowadzącego do zderzenia jest znacznie mniejsze.



Rys. 1. Wykres HEP pilota przy użyciu drona DJI (HEP1) oraz Autel Robotics (HEP2)



Rys. 2. Wykres niezawodności pilota przy użyciu drona DJI (R1) oraz Autel Robotics (R2)

6. Podsumowanie

Niezawodność stanowi niezwykle ważną cechę systemów technicznych, określającą ich zdolność do poprawnego funkcjonowania w czasie. Aspekt niezawodności odgrywa duże znaczenie w kontekście bezpiecznego eksploataowania maszyn i urządzeń, ponieważ wystąpienie awarii może mieć wiele negatywnych następstw, w tym oddziałujących na zdrowie i życie człowieka. Jednym z uwarunkowań wpływających na poziom niezawodności jest poprawne realizowanie zadań przez personel.

Analiza literatury wykazała, że możliwość wystąpienia zderzenia bezzałogowego statku powietrznego jest istotnym problemem, którego znaczenie wzrasta wraz z intensyfikacją wykorzystywania dronów. Problem ten można rozpatrywać w kategorii zagrożenia dla zdrowia i życia ludzkiego, jak również w kontekście generowania strat materialnych podczas zderzeń z obiektami infrastruktury, innymi pojazdami czy przedstawicielami świata natury. Zderzenie bezzałogowego statku powietrznego stwarza ryzyko dla bezpieczeństwa, a skala zagrożenia jest uzależniona od gabarytów drona, miejsca realizacji misji, poprawności organizacji operacji, właściwego zaplanowania lotu czy umiejętności oraz doświadczenia pilota w realizacji danej misji czy użytkowaniu danego drona.

Ograniczanie ryzyka zderzeń jest osiągane poprzez wdrażanie organizacyjnych oraz technicznych, które mają na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa ludzi, innych obiektów latających, elementów środowiska naturalnego oraz infrastruktury. Zwiększanie bezpieczeństwa osiągane jest poprzez wydzielanie stref lotniczych, stosowanie systemów detekcji i neutralizacji czy wprowadzenie kategorii operacji oraz uprawnień dla pilotów. Do rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo należy zaliczyć również systemy wykrywania i unikania przeszkód. Duży wpływ na uniknięcie zderzenia ma poprawne wykonywanie zadań przez pilota bezzałogowego statku powietrznego.

Analiza niezawodności pilota, przeprowadzona z użyciem metody HEART, wskazała że istnieje szereg czynników warunkujących poziom niezawodności pilota, wpływający na ryzyko wystąpienia zderzenia. Główne znaczenie ma doświadczenie posiadane przez pilota, związane z obsługiwaniem konkretnego urządzenia. Przyjęte do obliczeń założenia umożliwiły stwierdzenie, że prawdopodobieństwo popełnienia błędu stwarzającego ryzyko zderzenia jest pewne w przypadku użycia drona, z którym pilot nie miał wcześniej okazji pracować. Zaproponowano metodę minimalizacji ryzyka, związaną z wykorzystaniem do misji drona, który był już eksploatowany przez pilota. Doświadczenie oraz umiejętności posiadane przez pilota stanowią kluczowy czynnik przekładający się na poprawne zaplanowanie operacji, prawidłowe przygotowanie bezzałogowego statku powietrznego oraz bezpieczne przeprowadzenie lotu.

7. Literatura

1. M. Lorek and M. Magniszewski, "The use of unmanned aerial vehicles by the Polish police". *Journal of Security and Sustainability Issues*, 11, 481-488, 2021. DOI 10.47459/jssi.2021.11.43
2. S.A.H. Mohsan, M.A. Khan, F. Noor, I. Ullah and M.H. Alsharif, "Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review". *Drones*, 6, 147, 2022. DOI 10.3390/drones6060147
3. G. Singhal, B. Bansod and L. Mathew, "Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review". *Preprints*, 2018110601, 2018. DOI 10.20944/preprints201811.0601.v1.
4. RPAS. Remotely Piloted Aircraft Systems. The Global Perspective, 15th Annual Edition (October 2018) Available: https://rps-info.com/publications_old-page/rpas-yearbook-2018/#page/1 (accessed on December 01, 2022).
5. S. Agostino, M. Mammone, M. Nelson, T. Zhou, "Classification of Unmanned Aerial Vehicles Aeronautical Engineering", *Mechanical Engineering* 3016, The University of Adelaide, 2007.
6. K. Balcer, "Classification of unmanned aerial vehicles in relation to the specifications and provisions of Polish and international law", *Developments In Mechanical Engineering*, 17(9), 2021. DOI: 10.37660/dme.2021.17.9.1
7. A. Michalska, "Introduction to Reliability Tests of Unmanned Aircraft Used in the Armed Forces of the Republic of Poland. *Safety & Defense*, 5(2), 54-61, 2019. DOI 10.37105/sd.57.
8. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (*Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 152/45).
9. Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) 2020/1058 z dnia 27 kwietnia 2020 r. zmieniające rozporządzenie delegowane (UE) 2019/945 w odniesieniu do wprowadzenia dwóch nowych klas systemów bezzałogowych statków powietrznych (*Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 232/1), Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1058&from=PL> (accessed on December 6, 2022).
10. G.E.M. Abro, S.A.B.M. Zulkifli, R.J. Masood, V.S. Asirvadam and A. Laouti, "Comprehensive Review of UAV Detection, Security, and Communication Advancements to Prevent Threats". *Drones*, 6, 284, 2022. <https://doi.org/10.3390/drones6100284>.
11. M. Feltynowski and M. Zawistowski, "Zagrożenia związane z wykorzystaniem bezzałogowych platform w służbach ratunkowo-porządkowych. *BITP VOL. 51 ISSUE 3*, pp. 138–149, 2018. DOI 10.12845/bitp.51.3.2018.10.
12. A. Konert, "Odpowiedzialność operatora bezzałogowego statku powietrznego za opóźnienie lub odwołanie lotu", *Ius Novum*, 1, 2021. DOI: 10.26399/iusnovum.v15.1.2021.09/a.konert.

13. J. Łukasiewicz, „Bezzałogowe statki powietrzne jako źródło zagrożeń infrastruktury zaopatrzenia państw w energię elektryczną oraz proponowane metody ochrony tej infrastruktury”, *Terroryzm. Studia, analizy, prewencje*, 1(1), s. 90 – 122, 2022. DOI: 10.4467/27204383TER.22.004.15420.
14. G. Pietrek and M. Pietrek, „Bezzałogowe statki powietrzne jako zagrożenie dla infrastruktury krytycznej państwa”, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 83, s. 163 – 174, 2022. DOI: 10.5604/01.3001.0016.0230
15. G. Hansen, F. Zeller and R. Austin, “Reliability of UAVs and Drones”, *DSIAC Journal*, Vol. 4, No. 2, Spring 2017. Available: <https://dsiac.org/wp-content/uploads/2020/05/dsiac-spring-2017-volume-4-number-2.pdf> (accessed on December 19, 2022).
16. M. Krawczyk, “Conditions for unmanned aircraft reliability determination”. *Eksplatacja i niezawodność*, t. 15, nr 1, Polska Akademia Nauk. Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne PAN, s. 31–36, 2013.
17. M. Krawczyk, „Niezawodność polskich samolotów bezpilotowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*; (3 (224)):52–62, 2012.
18. C. Lum, D. Tsukada, “UAS Reliability and Risk Analysis”, 2016. DOI: 10.1002/9780470686652.eae1148.
19. E. Petritoli, F. Leccese and L. Ciani, “Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles”. *Sensors*; 18(9):3171, 2018. DOI: 10.3390/s18093171.
20. E. Balestrieri, P. Daponte, L. De Vito, F. Picariello, I. Tudosa, “Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview”. *Sensors*, 21, 8253, 2021. DOI: 10.3390/s21248253.
21. L. Cwojdzński, J. Lewitowicz and A. Żyluk, „Kolizje bezzałogowych statków powietrznych z załogowymi statkami powietrznymi”, *Journal of KONBiN*, 2(22), 2012. DOI: 10.2478/jok-2013-0017.
22. https://www.pansa.pl/uas_geozones/ (accessed on December 15, 2022).
23. <https://www.pansa.pl/asml/know-how/> (accessed on December 15, 2022).
24. Wytoczne nr 17/2023 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 6 czerwca 2023 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych (Dz. U. z 2023 r., poz. 42).
25. G. Jaromi, D. Kordos, T. Rogalski, P. Rzucidło and P. Szczerba, „Selected test elements of the vision anti-collision system for light and unmanned aerial vehicles”. *Autobusy–Tech. Eksploat. Syst. Transp.*, 227, 265–271, 2019. DOI: 10.24136/atest.2019.048.
26. P. Rzucidło, G. Jaromi, T. Kapuściński, D. Kordos, T. Rogalski and P. Szczerba, „In-Flight Tests of Intruder Detection Vision System”. *Sensors*, 21, 7360, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21217360>.
27. P. Rzucidło, T. Rogalski, G. Jaromi, D. Kordos, P. Szczerba and A. Paw, “Simulation studies of a vision intruder detection system”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 92 No. 4, pp. 621-631, 2020. DOI: 10.1108/AEAT-04-2019-0065.

28. J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman and A. Chehab, "Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations Internet Things", 11, Article 100218, 2020. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
29. V. Chamola, P. Kotesch, A. Agarwal, Naren, N. Gupta and M. Guizani, "A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques", Ad Hoc Networks, Vol. 111, 102324, 2021. DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102324.
30. H. Kang, J. Joung, J. Kim, J. Kang and Y.S. Cho, "Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems", in IEEE Access, vol. 8, pp. 168671-168710, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473.
31. M. Tkacz, „Bezzałogowe statki powietrzne jako źródło zagrożeń dla ruchu lotniczego”, Przegląd Policyjny, 134(2), 233-248, 2019. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7439.
32. A.C. Ogmen and I. Ekmekci, HEART Hybrid Methods for Assessing Human Reliability in Coal-Fired Thermal Power Plant Process. Sustainability, 14, 10838, 2022. DOI: 10.3390/su141710838.
33. N. Sembiring, M.M. Tambunan and M. Febriani, "Human error analysis on production process of door products with SHERPA and HEART method". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 505, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/505/1/012025.
34. J.C. Williams, "Heart – A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology", Safety and Reliability, 35:3, 5-25, 2015. DOI: 10.1080/09617353.2015.11691046.
35. J.C. Williams, J.L. Bell, "Consolidation of the Error Producing Conditions Used in the Human Error Assessment and Reduction Technique (Heart)", Safety and Reliability, 35:3, 26-76, 2015. DOI: 10.1080/09617353.2015.11691047.
36. "Human Error Assessment & Reduction Technique (HEART)", https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_2242014/EIA/app/app12.10.pdf (accessed on January 3, 2023).
37. E. Akyuz, M. Celik, "A methodological extension to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships", Saf. Sci., 75, pp. 146-155, 2015. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.008.
38. A. Petruni, E. Giagloglou, E. Douglas, J. Geng, M.C. Leva and M. Demichela, "Applying Analytic Hierarchy Process (AHP) to choose a human factors technique: Choosing the suitable Human Reliability Analysis technique for the automotive industry", Saf Sci, Vol. 119, 2019. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.05.007.
39. Podręcznik Użytkowania DJI Mavic 2 Pro/Zoom, Available: <https://dji-ars.pl/media/instrukcje/dji-mavic-2.pdf>.
40. User Manual EVO Lite Series, Available: <https://www.vertigodrones.com/assets/images/EVO%20Lite%20Series%20User%20Manual%20-%20EN.pdf>.